

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

VÝBĚR VHODNÉHO USPOŘÁDÁNÍ TOKU PRACOVNÍCH LÁTEK S LAMINÁRNÍM REŽIMEM PROUDĚNÍ V TRUBKOVÉM CHLADIČI

SELECTION OF SUITABLE FLUID FLOW DIRECTIONS IN LAMINAR FLOW TUBULAR COOLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc.DAVID KROBOT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK JEGLA, Ph.D.

BRNO 2009

Abstrakt:

Práce se zabývá výběrem vhodného uspořádání toku pracovních látek ve výměníku tepla typu trubka v trubce. V úvodu jsou probrány konstrukční řešení výměníku trubka v trubce. Také jejich vliv na procesní charakteristiky toku. Poté i rozdíly mezi souproudým a protiproudým tokem, jejich výhody a nevýhody.

V další části jsou uvedeny základní výpočtové vztahy používané v tepelně-hydraulickém návrhu výměníku tepla spolu s objasněním principů přenosu tepla a činnosti výměníku. Jsou zde probrány specifika proudění tekutiny s laminárním tokem.

Třetí část se detailně zaměřuje na výpočet výměníku tepla trubka v trubce. Nejprve jsou detailně probírány faktory ovlivňující charakter toku. Poté následuje detailní řešení výpočtových postupů návrhového a konstrukčního výpočtu, včetně různých přístupů k jejich řešení. Na toto navazuje další kapitola, která tyto výpočty využívá k rozhodování o vhodnosti toku dle různých kritérií.

Poslední kapitola se pak věnuje vlastní realizaci a převedení výpočtů řešení výměníku tepla do programové podoby v programu *Maple*. Také popisu sestavených algoritmů a později i ovládání použitých programů, tak aby byl kterýkoliv uživatel schopen využít připravené programové řešení. V práci jsou na různých místech použity příklady výpočtů z těchto programů v číselných i grafických podobách.

Klíčová slova: výměník tepla, trubka v trubce, laminární tok, vedení tepla, výměna tepla, přestup tepla, procesní charakteristiky toku, proudění kapalin, Maple,

Abstract:

This master's thesis is devoted to problematic of selection of suitable flow directions in double pipe heat exchanger. First chapter is oriented to the construction of tube heat exchangers. It is also discussed impact of construction solution to the flow character and changing of his process parameters. The difference between parallel and countercurrent flow is also occurred in this parts.

The next chapter is focused to the basics of heat-hydraulic calculations of heat exchanger. This also means explanation of ways of heat transfer and heat exchanger function. There are told about specific access to the solving problem of fluid laminar flow.

The third chapter is detailed focused to the calculating of heat exchanger. At first is discussed factors, which have impact to the flow character. Next are detailed descriptions of design and controlling calculations, including more alternative ways to solve it. Next chapter exploit those results for deciding, which flow arrangement will be better for given case.

Last chapter contain realization and reformulating of process heat exchanger calculating to the program code in *Maple*. There is also description of used algorithms and operating with them, so any user could be able to work with it. In this master's thesis are used many examples from attached programs on different parts.

Keywords: heat exchanger, double pipe heat exchanger, laminar flow, heat conduction, heat convection, heat exchange, heat transfer, process flow characterization, fluid flow, *Maple* software

Bibliografická citace

KROBOT, D. *Výběr vhodného uspořádání toku pracovních látek s laminárním režimem proudění v trubkovém chladiči*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 129 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

V Brně

Dne 20. 5. 2008

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Jeglovi, Ph.D., za odborné vedení a podporu při vypracování této diplomové práce.

Bc. David Krobot

Obsah

SEZNAM ZNAČEK A SYMBOLŮ	9
PODOBNOSTNÍ BEZROZMĚRNÁ ČÍSLA	10
1 ÚVOD	11
1.1 Trubkové výměníky tepla v procesním průmyslu.....	11
1.2 Trubkový výměník typu trubka v trubce	13
1.3 Různé typy uspořádání toku pracovních látek ve výměnících tepla	14
1.3.1 Souproud	14
1.3.2 Protiproud	16
1.4 Střední logaritmický teplotní rozdíl	16
2 ZÁKLADNÍ VZTAHY PRO VÝPOČET VÝMĚNÍKŮ TEPLA TYPU TRUBKA V TRUBCE	18
2.1 Rovnice tepelné bilance	18
2.2 Rovnice tepelného výkonu.....	19
2.3 Mechanismy sdílení tepla a jejich rovnice	19
2.3.1 Sdílení tepla vedením.....	20
2.3.2 Sdílení tepla prouděním	22
2.3.3 Součinitel přestupu tepla, kritéria podobnosti, hydraulický průměr	23
2.4 Součinitel prostupu tepla.....	25
2.5 Součinitel zanášení.....	27
2.6 Výpočet součinitele prostupu tepla.....	27
2.7 Rovnice pro výpočet tlakových ztrát.....	28
3 ODVOZENÍ POSTUPU VÝPOČTU CHARAKTERISTIK DŮLEŽITÝCH PRO VÝBĚR VHODNÉHO USPOŘÁDÁNÍ TOKU TEKUTIN	32
3.1 Faktory ovlivňující charakter toku tekutiny	32
3.1.1 Hmotnostní tok, hydraulický průměr	32
3.1.2 Teplota, hydraulický průměr	33
3.1.3 Hmotnostní tok, teplota	33
3.2 Metody řešení kontrolního výpočtu	34
3.2.1 Popis metody ε -NTU	34
3.2.2 Popis metody využívající střední logaritmický teplotní spád.....	35
3.3 Detailní popis kontrolního výpočtu výměníku tepla s laminárním tokem	36
3.3.1 Zadané údaje	36
3.3.2 Plocha výměny tepla, hydraulické průměry	37
3.3.3 Odhad výstupní teploty proudu 1, tepelný výkon proudu	37
3.3.4 Výpočet výstupní teploty druhého proudu	37

3.3.5	Výpočet termofyzikálních vlastností tekutin obou proudů	38
3.3.6	Výpočet procesních charakteristik	38
3.3.7	Výpočet tlakových ztrát	39
3.3.8	Výpočet součinitelů přenosu tepla a součinitele prostupu tepla	39
3.3.9	Výpočet teploty stěny vnitřní trubky	39
3.3.10	Určení středního logaritmického teplotního spádu, přenášený výkon výměníkem	40
3.3.11	Hodnocení výsledků	41
3.4	Detailní popis návrhového výpočtu výměníku tepla	42
3.4.1	Zadané údaje	42
3.4.2	Výpočty dalších charakteristik	42
3.4.3	Vyčíslení bezrozměrných podobnostních kritérií	43
4	POPIS SOFTWAREVÝCH ŘEŠENÍ	44
4.1	Pomocný program VBA	44
4.1.1	Popis a ovládání programu v prostředí VBA	44
4.2	Pomocné programy Maple	45
4.3	Program sledující změny Reynoldsova čísla	46
4.3.1	Fyzikální vlastnosti tekutin	46
4.3.2	Vstupní data, výpočet Reynoldsových čísel	47
4.4	Programy kontrolního výpočtu	49
4.4.1	Zadání vstupních dat	49
4.4.2	Fyzikální vlastnosti obou medií	50
4.4.3	Výpočet společných charakteristik obou proudů	50
4.4.4	Souproud	51
4.4.5	Hlavní výpočtový blok souproudu	55
4.4.6	Protiproud	58
4.4.7	Hlavní výpočtový blok protiproudu	59
4.5	Programy návrhového výpočtu	62
4.5.1	Příprava rovnic pro výpočet minimální požadované délky trubky výměníku	63
4.5.2	Zadání vstupních dat	64
4.5.3	Fyzikální vlastnosti tekutin obou proudů	65
4.5.4	Výpočet společných charakteristik proudů	65
4.5.5	Souproud	67
4.5.6	Protiproud	70
5	ROZHODNUTÍ O VHODNOSTI TYPU TOKU	72
5.1	Kritéria rozhodování	72
5.1.1	Plocha výměny tepla	72
5.1.2	Vliv průměru trubek na velikost plochy výměny tepla	73
5.1.3	Jiná kritéria	75
5.2	Řešené příklady	76
5.2.1	Kontrolní výpočet 1	76
5.2.2	Kontrolní výpočet 2	78
5.2.3	Návrhový výpočet	79
6	POPIS PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ PROGRAMU MAPLE	82
6.1	Prostředí classic worksheet	82

6.2	Vložení vstupních dat	83
6.3	Výpočet pro zadaná vstupní data	83
7	ZÁVĚR	84
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	85
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
10	SEZNAM ROVNIC	87
11	PŘÍLOHY	91

Seznam značek a symbolů

<i>Obecný symbol</i>	<i>Identifikátor v Maple</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
A	A1o	plocha výměny tepla	m
c_p	cp	měrná tepelná kapacita	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$c_{p_{stř}}$	cp_st	střední logaritmická měrná kapacita	$\frac{J}{kg \cdot K}$
d_{1_i}	d1i	vnitřní průměr vnitřní trubky	m
d_{1_o}	d1o	vnější průměr vnitřní trubky	m
d_{2_i}	d2i	vnitřní průměr vnější trubky	m
d_h	dh	hydraulický průměr	m
k	k	součinitel prostupu tepla	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
L	L	délka trubek	m
\dot{m}	m	hmotnostní průtok	kg/s
\dot{Q}	Q	tepelný tok (tepelný výkon)	$J \cdot s^{-1}$
R_z	Rz	součinitel zanášení	-
$t_{stř}$	t_st	střední teplota proudu	$^{\circ}C$
t_{11}	t11	teplota média 1 v místě 1	$^{\circ}C$
t_{12}	t12	teplota média 1 v místě 2	$^{\circ}C$
t_{21}	t21	teplota média 2 v místě 1	$^{\circ}C$
t_{22}	t22	teplota média 2 v místě 2	$^{\circ}C$
t_s	ts	tloušťka stěny	m
t_w	tw	teplota stěny trubky	$^{\circ}C$
t_f	tf	střední teplota toku tekutiny	$^{\circ}C$
u	u	střední rychlost toku	$\frac{m}{s}$

<i>Použité Řecké symboly</i>	<i>Identifikátor v Maple</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
α	alpha	součinitel přenosu tepla	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
ΔT_{\max}	d_Tmax	maximální teplotní rozdíl	$^{\circ}C$
ΔT_{\min}	d_Tmin	minimální teplotní rozdíl	$^{\circ}C$
ΔT_{\ln}	dT_ln	střední logaritmický teplotní rozdíl	$^{\circ}C$
η	eta	dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
η_f	etaf	dynamická viskozita středního proudu	$Pa \cdot s$

η_w	etaw	dynamická viskozita u stěny trubky	$Pa \cdot s$
λ	lambda	tepelná vodivost materiálu trubky	$\frac{W}{m \cdot K}$
λ	lambda	tepelná vodivost toku	$\frac{W}{m \cdot K}$
ρ	rho	hustota	$\frac{kg}{m^3}$

<i>Použité dolní indexy</i>	<i>Identifikátor v Maple</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotoka</i>
1	1	index hodnot vnitřního potrubí	-
2	2	index hodnot mezikruží	-

Podobnostní bezrozměrná čísla

Nusseltovo číslo	$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda_{tek}}$
Prandtlovo číslo	$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}$
Reynoldsovo číslo	$Re = \frac{d_h \cdot u \cdot \rho}{\eta}$

1 Úvod

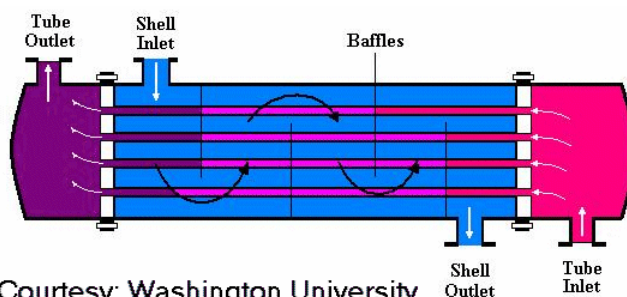
Tato diplomová práce se zabývá zpracováním postupu popisu podle kterého lze rozhodnout zda je výhodnější volit u výměníku tepla typu trubka v trubce souproudý, nebo protiproudý tok. Výměníky tepla jsou jedny z nejčastěji používaných zařízení v procesním inženýrství. Jsou to zařízení, která slouží k přenosu tepla mezi různými látkami. Jejich hlavním úkolem je tedy zajišťovat ohřev, nebo chlazení tekutin, někdy i tuhých látek. Výměníků existuje celá řada a dají se dělit podle mnohých kritérií. Jedno z možných rozdělení by mohlo být podle toho, jakým způsobem se přenos tepla realizuje. U *rekuperačních* výměníků jsou látky, které si teplo předávají, odděleny pevně od sebe stěnou trubky. Tato stěna vytvoří dvě plochy, jenž se budou přenosu tepla také účastnit. *Regenerační* výměníky jsou takové, kde přenos mezi dvěma látkami zprostředkuje látka třetí. Třetí látka odejme teplo teplejšímu proudu a předá ho proudu studenějšímu. Poslední typ jsou směšovací výměníky. V nich dojde k přímému styku obou toků. Dochází u nich tedy nejen k přenosu tepla, ale i hmoty.

1.1 Trubkové výměníky tepla v procesním průmyslu

Trubkové výměníky jsou jedny z nejpoužívanějších v praxi, proto se tato práce zabývá tímto typem výměníku. Základní typy jsou:

- výměník tepla s pevnými trubkovnicemi
- výměník tepla s plovoucí hlavou
- výměník tepla s U-trubicemi
- výměník tepla typu trubka v trubce

Výměník tepla s pevnými trubkovnicemi



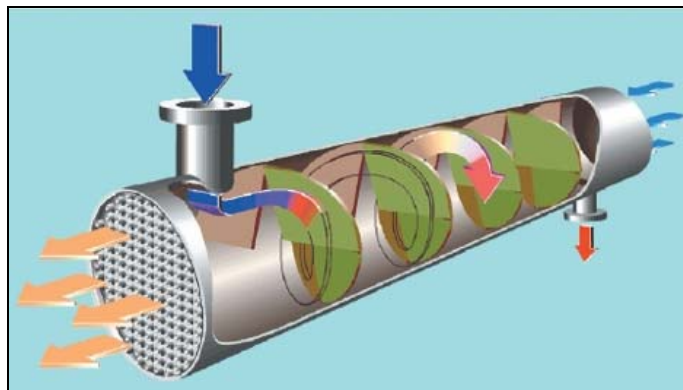
Courtesy: Washington University

Obr. 1.1.1 Výměník tepla s pevnými trubkovnicemi

<i>legenda k</i>	<i>tube inlet</i>	- vstupní proud do trubek
<i>obr. 1.1.1</i>	<i>tube outlet</i>	- výstupní proud z trubek
	<i>shell inlet</i>	- vstupní proud do pláště
	<i>shell outlet</i>	- výstupní proud z pláště
	<i>baffles</i>	- přepážky

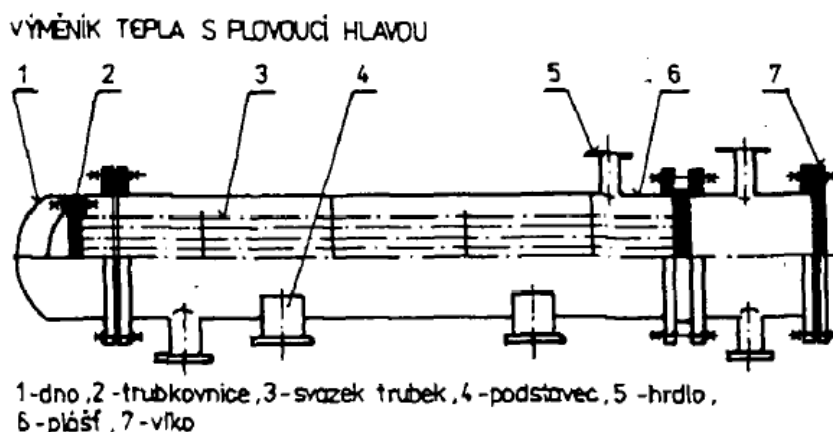
Patří do skupiny rozebíratelných výměníků. Teplotní parametry pláště a trubek spolu s jejich konstrukčními materiály umožňují kompenzaci teplotní dilatace pouze v malém rozmezí v porovnání s dalšími typy uvedenými dále. Jsou vhodné obzvláště pro čisté pracovní

látky s minimálním účinkem zanášení [1]. Liší se zejména použitým přepážkovým systémem. Na obr. 1.1.2 je ukázka výměníku se šroubovicovým přepážkovým systémem.



Obr. 1.1.2 Výměník se šroubovicovým přepážkovým systémem

Výměník tepla s plovoucí hlavou

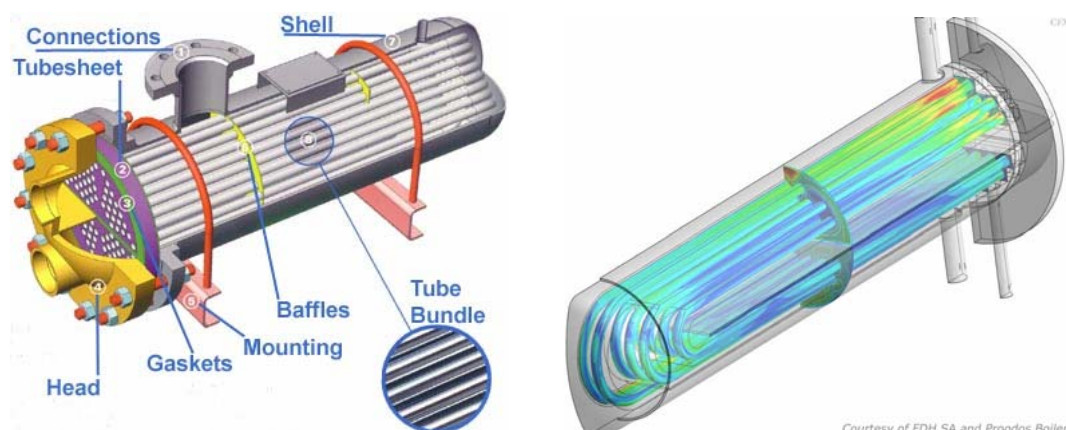


Obr. 1.1.3 Schéma výměníku s plovoucí hlavou [2]

Výměník tepla s plovoucí hlavou, viz. obrázek 1.1.3 lze díky své konstrukci poměrně snadno demontovat i čistit. Umožňuje také zachycení teplotní roztažnosti, protože hlava se může vlivem teplotních rozdílů volně pohybovat uvnitř výměníku. Dají se používat v širokém rozmezí teplot a tlaků.

Výměníky tepla s U-trubkami

Charakteristickým znakem těchto výměníků jsou trubky tvaru U viz. obrázek 1.1.4. Tento typ výměníku se často používá tam, kde je vysoký požadavek na těsnost, například u nebezpečných látek. Je to dáno tím, že U-trubky jsou z jednoho kusu a nemusí se tedy počítat s možností selhání, nebo netěsnosti těsnění v trubkovém prostoru. U-trubky disponují dostatečnou rezervou pro teplotní dilataci. Konstrukce dovozuje snadné čištění mezitrubkového prostoru. Je to nejrozšířenější typ výměníku v petrochemickém a chemickém průmyslu. [3]



Obr. 1.1.4 Trubkové výměníky s U-trubkami [3]

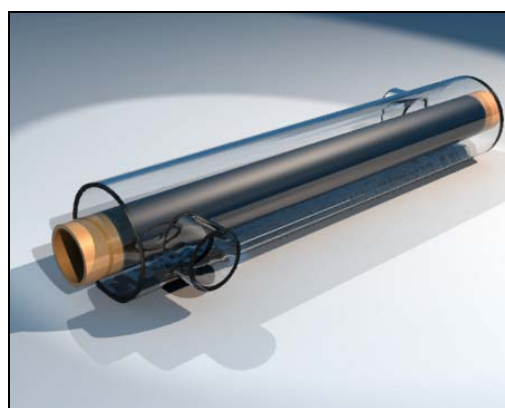
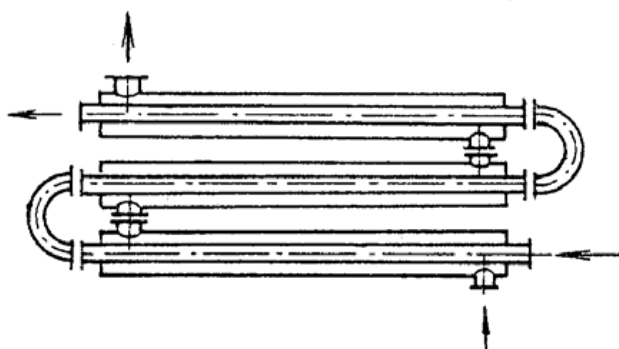
<i>legenda k</i>	<i>shell</i>	- plášť
<i>obr. 1.1.4</i>	<i>tube bundle</i>	- svazek trubek
	<i>baffles</i>	- přepážky
	<i>connections</i>	- příruba
	<i>tubesheet</i>	- trubkovnice
	<i>head</i>	- hlava
	<i>mounting</i>	- připevnění

Posledním ze základních typů trubkových výměníků je výměník trubka v trubce, na který je tato diplomová práce zaměřena. Tento typ je představen v následující kapitole.

1.2 Trubkový výměník typu trubka v trubce

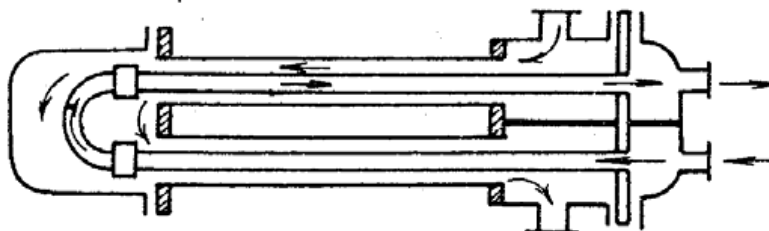
Je v podstatě každý trubkový výměník bez přepážkového systému s maximálně 8 trubkami v plášti. Jsou to výměníky jednoduché konstrukce. Mezi jejich výhody patří také fakt, že se pro výrobu používají standardizované trubky. Obecně mají dobrou spolehlivost a životnost. Výměník typu trubka v trubce může být v rozebíratelném, nebo nerozebíratelném provedení.

Nerozebíratelné provedení je uvedeno na obr. 1.2.1. Je vidět, že se skutečně jedná o jednoduchou trubku, která se vsazena do druhé o větším průměru a odlišné konstrukci. Tento výměník je koncipovaný jako modulový. To znamená, že je tvořen z jednotlivých základních částí, modulů, viz. obrázek 1.2.2. Ty se spojí spojovacími díly do větších sestav, jak je patrné z obrázku 1.2.1. Takto lze dosáhnout větší plochy přenosu tepla. Nevýhoda v případě tohoto nerozebíratelného provedení spočívá v nemožnosti mechanicky čistit mezitrubkový prostor.



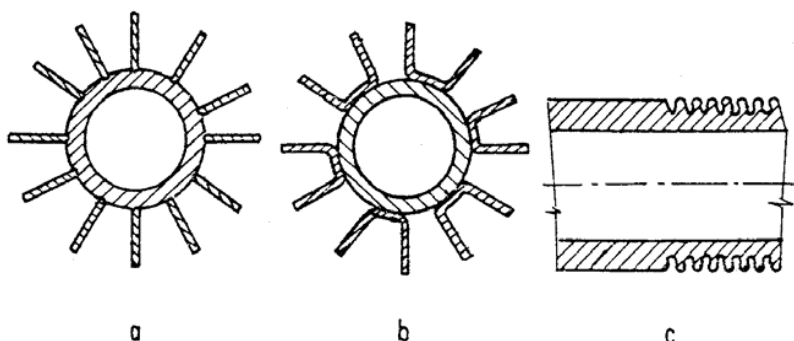
Obr. 1.2.1 Výměník trubka v trubce-tří modulový [4] Obr. 1.2.2 Modul výměníku [5]

Rozebíratelné provedení z obrázku 1.2.3 nevýhody špatného mechanického čištění odstraňuje. U těchto výměníků jsou přípustné i vysoké rychlosti proudění. To zvyšuje jejich účinnost, která může být často větší, jak u trubkových výměníků se segmentovými přepážkovými systémy. Naopak mezi jeho nevýhody patří větší rozměry a tím spotřeba materiálu na jeho výrobu.



Obr. 1.2.3 Rozebíratelné projevění výměníku typu trubka v trubce

Přenos tepla a tedy i účinnost u výměníků typu trubka v trubce lze zvyšovat vhodnými konstrukčními úpravami. Mezi tyto patří zejména úprava vnějšího povrchu trubek vně pláště. Jedná se o různé typy rýhování a žebrování, které mohou být jak příčné, tak podélné, viz. obrázek 1.2.4.



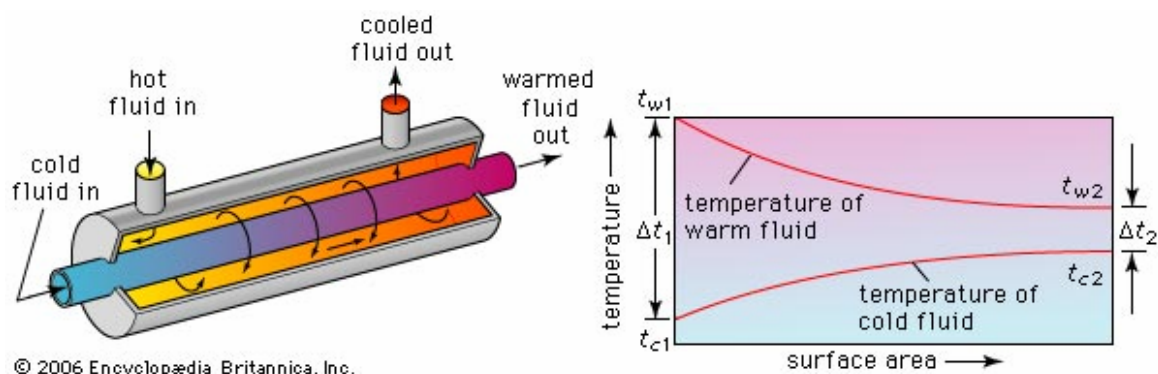
Obr. 1.2.4 Typy konstrukčních úprav vnějšího povrchu trubek a), b) podélné c) příčné

1.3 Různé typy uspořádání toku pracovních látek ve výměnících tepla

1.3.1 Souproud

Souproudé uspořádání se vyznačuje tím, že obě látky proudí ve stejném směru. Výstupní teplota horkého proudu je vždy vyšší než výstupní teplota studeného proudu.

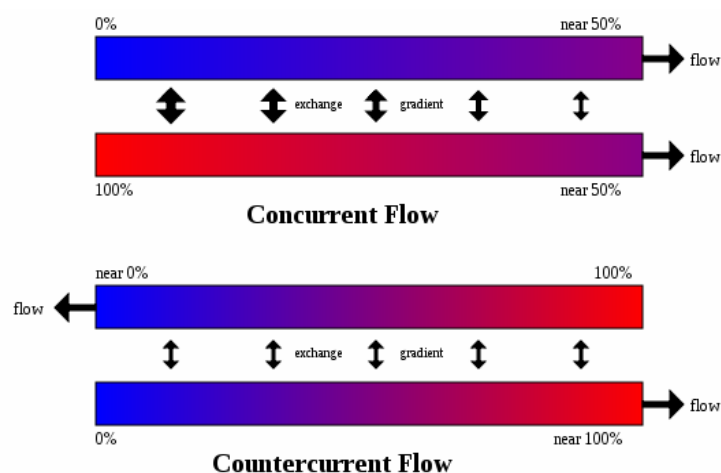
Narozdíl od protiproudého toku má souproudé uspořádání markantní rozdíl teplot mezi teplým a studeným proudem na vstupu do výměníku, viz. obrázek 1.3.1. Tento fakt se s výhodou využívá u velmi viskózních látek. Velký teplotní rozdíl na vstupu snižuje viskozitu látky. Toto vede k menším nárokům na výkon zařízení, které pracovní látku pumpuje do výměníku. Snižování viskozity látky má také pozitivní vliv na zkrácení vzdálenosti, kterou tok potřebuje na přestup z laminárního na turbulentní proudění. Výsledkem je zvýšení přenosu tepla a tím výkonu výměníku. Tento typ výměníku tepla může být tedy použit tam, kde zvýšení přenosu tepla a snížení nároků na čerpací sílu vykompenzuje menší hodnotu středního logaritmického teplotního rozdílu a přinese tedy větší užitek.



Obr. 1.3.1 Souproudé uspořádání výměníku a průběh teplot [5]

legenda k	<i>cold fluid in</i>	- vstup chladného proudu
obr.1.3.1	<i>hot fluid in</i>	- vstup horkého proudu
	<i>cooled fluid out</i>	- horký (ochlazený) proud výstup
	<i>warmed fluid out</i>	- chladný (ohřátý) proud výstup
	<i>temperature of warm fluid</i>	- teplota horkého proudu
	<i>temperature of cold fluid</i>	- teplota studeného proudu
	<i>temperature</i>	- teplota
	<i>surface area</i>	- oblast stěny

Druhou výhodou souproudého toku je zmírnění teploty stěny trubky. Jak je patrné z obr. 1.3.2 je u souproudou (*concurrent flow, parallel flow*) teplotní interval u obou médií skoro poloviční, než v případě protiproudou (*countercurrent flow, counter flow*). V případě, kdy je na obou stranách trubky výměníku přibližně stejný součinitel přestupu tepla, tato vlastnost souproudého toku způsobí, že se teplota stěny trubky bude blížit průměrné hodnotě teplot obou proudů. V případě protiproudou jsou na jedné straně maximální teploty a na straně druhé jejich minimální hodnoty. Tyto větší teplotní rozdíly v případě protiproudou mohou být nežádoucí v potravinářském průmyslu, farmaceutickém a u teplotně citlivých látek. Navíc u některých látek může vlivem teplotního ovlivnění docházet k většímu zanášení a tvorbě usazenin na stěnách trubky a tím ke zmenšení tepelného výkonu. I ostatní typy zanášení jsou teplotně citlivé. Mezi nejvýznačnější patří odlupování, korozní zanášení, zanášení mrazem.

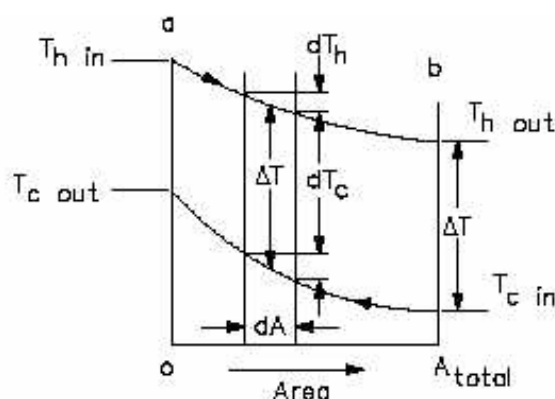


Obr. 1.3.2 Teplotní intervaly u souproudou a protiproudou

legenda k	<i>concurrent flow</i>	- souproudý tok
obr. 1.3.2	<i>countercurrent flow</i>	- protiproudý tok

1.3.2 Protiproud

Jak již název napovídá, tak v tomto případě kapaliny proudí výměníkem v opačném směru toku.



Obr. 1.3.3 Protiproudé uspořádání výměníku a průběh teplot

Výhody protiproudého toku

Větší efektivnost středního logaritmického teplotního rozdílu $\Delta \bar{T}_{\ln}$. Tedy větší využití energie teplého proudu. Také výstupní teplota teplého proudu může být v některých případech menší, jak výstupní hodnota teploty studeného proudu. Toto se nazývá „překřížení teplot“. Výhoda většího $\Delta \bar{T}_{\ln}$ spočívá v menších nárocích na velikost plochy výměny tepla při dosažení stejného tepelného výkonu. Tento výrok je patrný z rovnice přenosu tepla (1.3.1), kde tepelný tok \dot{Q} se rovná součinu $\Delta \bar{T}_{\ln}$, velikosti plochy přenosu tepla A a součinitele přenosu tepla k .

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta \bar{T}_{\ln} \quad (1.3.1)$$

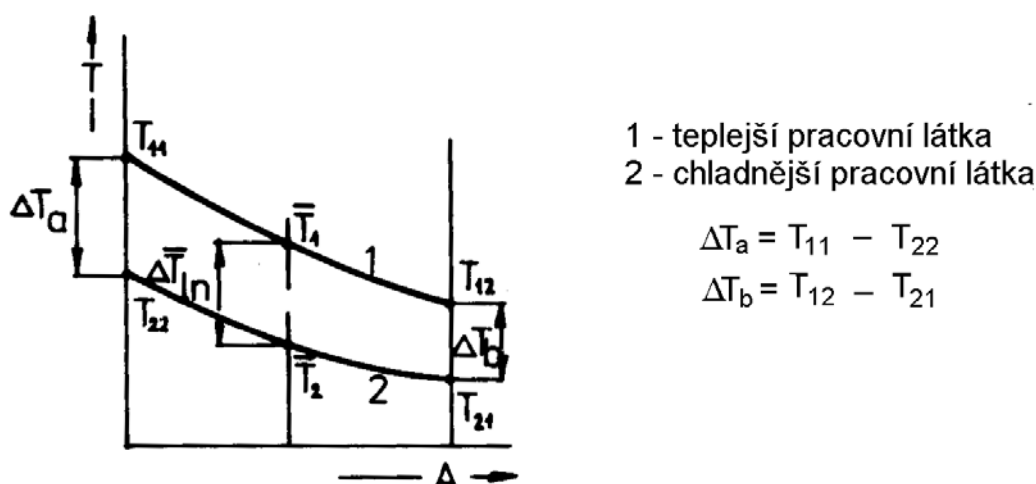
kde	\dot{Q} [J/s]	- tepelný tok
	A [m ²]	- plocha výměny tepla
	k [W/(m ² · K)]	- součinitel prostupu tepla
	$\Delta \bar{T}_{\ln}$ [°C]	- střední logaritmický teplotní rozdíl

Menší velikost plochy A má vliv na cenu samotného zařízení. Toto jsou důvody, které vedou k častějšímu použití protiproudého uspořádání. Spolu s faktem, že dokáže odebrat více tepla horkého proudu a lze jej použít i při menších teplotních rozdílech obou pracovních látek.

1.4 Střední logaritmický teplotní rozdíl

Se používá k určení teplotní hnací síly pro přenos tepla v systémech proudění (zejména u tepelných výměníků). Tedy vyšší hodnota $\Delta \bar{T}_{\ln}$ znamená vyšší přenesené teplo. $\Delta \bar{T}_{\ln}$ je logaritmický průměr teplotního rozdílu mezi teplým a studeným proudem na obou koncích výměníku.

Grafické znázornění $\Delta \bar{T}_{\ln}$ u protiproudého toku



Obr. 1.4.1 Grafické znázornění $\Delta \bar{T}_{\ln}$ u protiproudého toku

Křivka výměny tepla z obr. 1.4.1 je vlastně křivkou logaritmickou a proto se používá střední logaritmický rozdíl. Slouží tedy pro analýzu výměníků tepla s konstantními poměry teplot toků a hodnocení termálních vlastností výměníků.

Pro protiproud:

U protiproudu může nastat překřížení teplot. Musí se při výpočtu $\Delta \bar{T}_{\ln}$ určit, kde bude rozdíl teplot větší. To lze provést určením velikosti součinu $\dot{m}_1 \cdot \bar{c}_{p1}$ a $\dot{m}_2 \cdot \bar{c}_{p2}$. Tedy vynásobením hmotnostního toku a měrné tepelné kapacity pro proud 1 i 2. Minimální rozdíl teplot (ΔT_{\min}) pak bude na straně vstupu toho proudu, u kterého tato hodnota součinu vyjde vyšší. A maximální rozdíl teplot (ΔT_{\max}) na jeho výstupu.

$$\Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (1.4.1)$$

kde ΔT_{\max} [°C] - maximální teplotní rozdíl

ΔT_{\min} [°C] - minimální teplotní rozdíl

Pro souproud:

Jak již bylo řečeno dříve, nemůže dojít u souproudu k překřížení teplot. Z tohoto je jasné, že maximální rozdíl teplot (ΔT_{\max}) bude na vstupu pracovních látek do výměníku a minimální (ΔT_{\min}) na výstupu z něj.

$$\Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)}} \quad \text{nebo} \quad \Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (1.4.2)$$

kde T_1 [°C] - vstupní teplota teplého proudu

T_2 [°C] - výstupní teplota teplého proudu

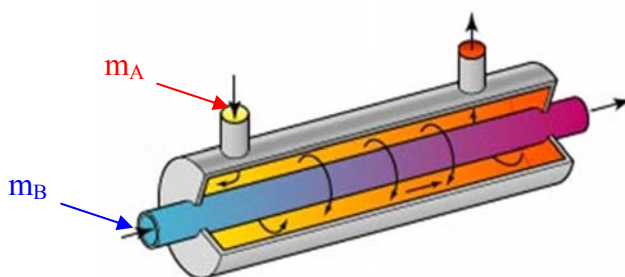
t_1 [°C] - vstupní teplota studeného proudu

t_2 [°C] - výstupní teplota studeného proudu

2 Základní vztahy pro výpočet výměníků tepla typu trubka v trubce

V této kapitole budou uvedeny základní výpočtové vztahy, které jsou použity pro návrh a výpočet trubkových výměníků tepla typu trubka v trubce.

2.1 Rovnice tepelné bilance



Obr. 2.1.1 Tepelný výměník a hmotnostní toky m_A a m_B .

Rovnice tepelné bilance vychází ze zákona zachování energie. Pak lze napsat:

$$\text{vstupní energie} = \text{výstupní energie} + \text{akumulace energie} + \text{ztráty}$$

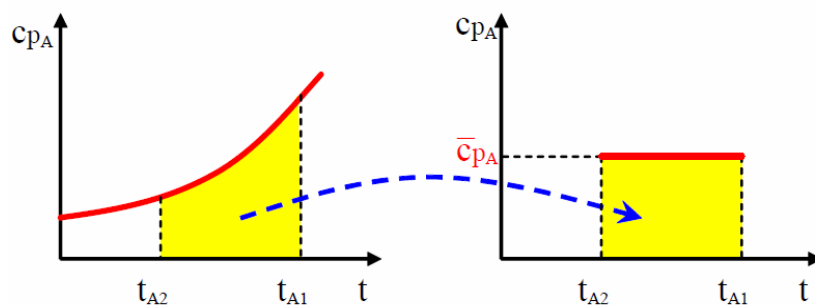
Jak je patrné z obr. 2.1.1 jako vstupní proud energie bude brána energie teplejší látky, jejíž hmotnostní tok je m_A . Tato energie je předávána chladnější látce. Tepelný tok \dot{Q} , tedy teplo, které předává teplejší látka chladnější se vypočítá dle rovnice (2.1.1). Teplo odebrané teplejší látky bude ekvivalentní teplu přijatému chladnější látkou. Označí-li se hmotnostní průtok teplejší látky jako m_A a chladnější m_B , jejich vstupní teploty indexem 1 a výstupní indexem 2, bude rovnice tepelné bilance odpovídat tvaru rovnice (2.1.2).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_{p_{stř}} \cdot (t_1 - t_2) \quad (2.1.1)$$

kde	\dot{Q} [J / s]	- tepelný tok (tepelný výkon)
	\dot{m} [kg / s]	- hmotnostní tok
	$c_{p_{stř}}$ [J / (kg · K)]	- střední logaritmická měrná tepelná kapacita
	t_1, t_2 [°C]	- teploty na vstupu a výstupu toku tekutiny

$$\dot{m}_A \cdot c_{p_{střA}} \cdot (t_{A1} - t_{A2}) = \dot{m}_B \cdot c_{p_{střB}} \cdot (t_{B2} - t_{B1}) \quad (2.1.2)$$

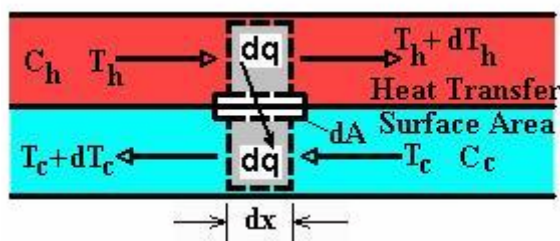
$c_{p_{stř}}$ je střední logaritmická měrná tepelná kapacita. Protože měrná tepelná kapacita c_p je funkcí teploty, jak je vidět na obr. 2.1.2 a má-li být v rovnici (2.1.2) brána jako konstantní, musí být spočítána použitím integrálu, tedy rovnicí (2.1.3).



Obr. 2.1.2 Výpočet $c_{p_{stř}}$ a jeho grafické znázornění

$$c_{p_{stř}A} = \frac{1}{t_{A1} - t_{A2}} \int_{t_{A2}}^{t_{A1}} c_{pA} dt_A \quad c_{p_{stř}B} = \frac{1}{t_{B2} - t_{B1}} \int_{t_{B1}}^{t_{B2}} c_{pB} dt_B \quad (2.1.3)$$

2.2 Rovnice tepelného výkonu



Obr. 2.2.1 Znázornění tepelného toku u výměníku tepla [6]

Při výměně tepla se vychází z rovnice *tepelné bilance*, tedy jak bylo uvedeno výše *vstupní energie = výstupní energie + akumulace energie + ztráty*. Akumulace energie se v případě výměníku trubka v trubce neuvažuje. Ztráty do okolí představují v běžných případech malé hodnoty, tak se také zanedbávají. Rovnice tepelné bilance se zjednoduší na tvar rovnice (2.2.1).

$$\dot{Q}_A = \dot{Q}_B = \dot{Q} \quad (2.2.1)$$

kde

- \dot{Q}_A [W] - tepelný tok přivedený teplou látkou
- \dot{Q}_B [W] - tepelný tok odvedený studenou látkou
- \dot{Q} [W] - tepelný tok

\dot{Q} se označuje jako tepelný výkon. Dle rovnic (2.1.1) a (2.1.2) rozepíšeme rovnici (2.2.1) do tvaru rovnice (2.2.2), kde tepelný tok může být vyjádřený, jak pomocí $c_{p_{stř}}$, tedy střední měrná tepelná kapacity, tak pomocí měrných entalpií, respektive jejich rozdílů.

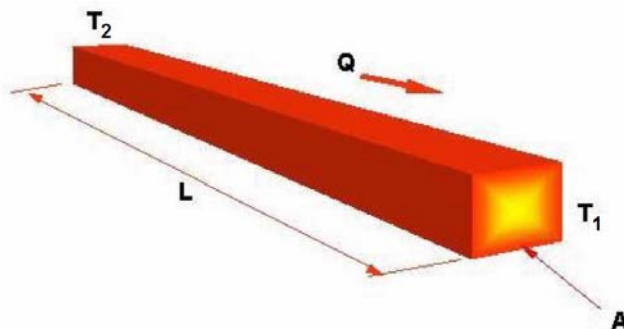
$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_A \cdot c_{p_{stř}A} \cdot (t_{A1} - t_{A2}) = \dot{m}_B \cdot c_{p_{stř}B} \cdot (t_{B2} - t_{B1}) \\ \dot{Q} &= \dot{m}_A \cdot (i_{A1} - i_{A2}) = \dot{m}_B \cdot (i_{B2} - i_{B1}) \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

2.3 Mechanismy sdílení tepla a jejich rovnice

U trubkových výměníků se počítá hlavně se dvěma typy sdílení tepla. Jedná se o sdílení tepla vedením (*kondukce*) a prouděním (*konvekce*). Jejich specifika budou probrána dále v samostatných kapitolách.

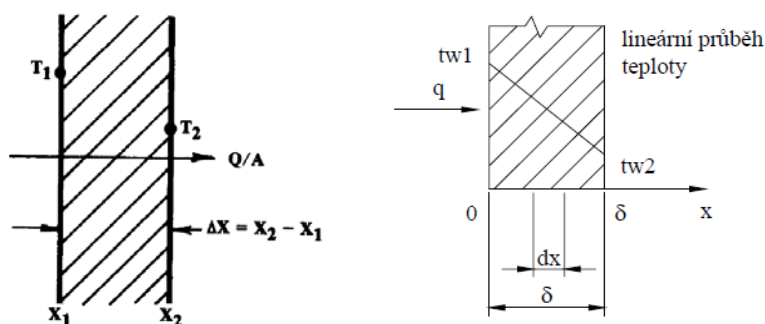
2.3.1 Sdílení tepla vedením

Nazývá se také kondukce. Sdílení tepla vedením probíhá v tuhé fázi hmoty díky nahodilému pohybu elektronů materiálem. Elektrony v teplejších místech materiálu mají větší kinetickou energii, než tyto v chladnějších místech. Elektrony si kinetickou energii předávají a tím dochází i k samotnému přenosu tepla. Tedy bude-li T_1 teplota teplejšího konce a T_2 chladnějšího, bude směr tepelného pohybu na obr. 2.3.1 dle šipky Q . [8]



Obr. 2.3.1 Sdílení tepla vedením [7]

Detailní popis sdílení tepla přenosem je složitý. Pro inženýrské potřeby je však vyřešen Fourierovou rovnicí. Je uvažován stabilní tok tepla napříč rovinnou stěnou, kde obě krajní plochy mají rozdílné teploty. Teplota T_1 je vyšší, jak teplota T_2 viz. obr. 2.3.2. Pak Furierova rovnice pro tepelný tok jednotkovou plochou má tvar rovnice (2.3.1). Ten lze upravit do tvaru s teplotním gradientem, viz. rovnice (2.3.2) Záporné znaménko před gradientem naznačuje, že tok tepla má obrácený směr v porovnání s růstem teploty napříč stěnou [8]. Průběh teploty napříč průřezem rovinnou stěnou je lineární závislostí.



Obr. 2.3.2 Přestup tepla rovinnou deskou [8] a jeho lineární průběh [4]

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} = \lambda \left(\frac{T_1 - T_2}{X_1 - X_2} \right) = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (2.3.1)$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} = -\lambda \frac{dt}{dx} = -\lambda \cdot \text{grad}(t) \quad (2.3.2)$$

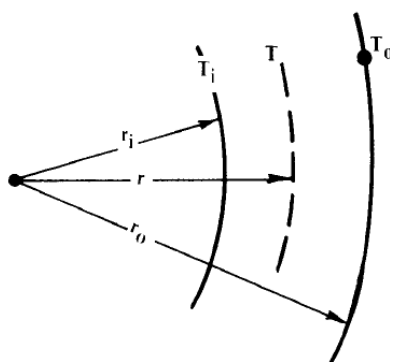
kde	\dot{Q} [W]	- tepelný tok (tepelný výkon)
	A [m ²]	- plocha výměny tepla
	\dot{q} [W / m ²]	- měrný (jednotkový) tepelný tok
	λ [W / (m · K)]	- tepelná vodivost tekutiny toku
	T_1, T_2 [°C]	- teploty na opačných stranách stěny

X_1, X_2 [m] - souřadnice vzdálenosti ve směru osy x

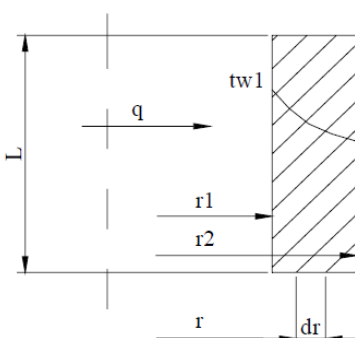
Vydělením tepelného toku \dot{Q} plochou výměny tepla A se získá měrný tepelný tok \dot{q} . Ten představuje tok tepla jednotkovou plochou. Tepelná vodivost λ je pro každý materiál jiná a udává míru schopnosti materiálu vést teplo. [8]

Vedení tepla stěnou trubky

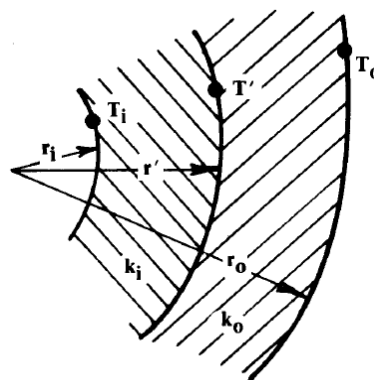
Předchozí rovnice byly použitelné pro vedení tepla rovinnou stěnou, kde průběh teploty je lineární. U výměníku typu trubka v trubce je však situace jiná. Na obr. 2.3.3 je uvedeno vedení tepla stěnou trubky. Obrázek 2.3.4 ukazuje průběh teploty touto stěnou a obrázek 2.3.5 ukazuje průřez bimetrickou stěnou. Tedy stěnou složenou ze dvou kovů.



Obr. 2.3.3 Vedení tepla trubkou



Obr. 2.3.4 Průběh teploty



Obr. 2.3.5 Bimetalová trubka

Při výpočtu vedení tepla u výměníku typu trubka v trubce platí, že plocha výměny tepla A se rovná povrchu válce. Tedy matematicky zapsáno $A = 2\pi rL$. Kombinací toho vztahu s rovnicí (2.3.2) je tvar rovnice (2.3.3). Tato může být dále integrována na tvar (2.3.4).

$$\frac{\dot{Q}}{2\pi rL} = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (2.3.3)$$

$$\dot{Q} = \frac{2\pi\lambda L(T_i - T_o)}{\ln(r_o / r_i)} \quad (2.3.4)$$

kde L [m] - délka trubky

r_o, r_i [m] - poloměry trubky dle obrázku 2.3.3

V těchto rovnicích je T_i teplota na vnitřní straně trubky a T_o teplota na vnější straně trubky. Když je $T_i < T_o$, pak výstupní tepelný tok \dot{Q} má zápornou hodnotu. To znamená, že směřuje ve směru dovnitř trubky.

Vedení tepla bimetrickou trubkou

V tomto případě je trubka složena ze dvou materiálů, viz. obr.2.3.5. Toto se někdy využívá jako ochrana proti korozi, nebo z ekonomických důvodů. Na výše uvedeném obrázku je r' rádius označující rozhraní mezi oběma materiály. T' je pak teplota v tomto místě. Dle rovnice (2.3.4) by pro vnitřní trubku platila rovnice (2.3.5) a pro vnější (2.3.6). Je zřejmé, že musí oběma trubkami, respektive materiály, proudit stejné množství tepla. Tedy oba tepelné toky

\dot{Q} budou ekvivalentní. Kombinací obou rovnic vznikne konečný tvar rovnice pro bimetalickou trubku (2.3.7). [8]

$$\dot{Q} = \frac{2\pi L \lambda_i (T_i - T')}{\ln(r'/r_i)} \quad (2.3.5)$$

$$\dot{Q} = \frac{2\pi L \lambda_0 (T_i - T')}{\ln(r_o/r')} \quad (2.3.6)$$

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln(r'/r_i)}{2\pi L \lambda_i} + \frac{\ln(r_o/r')}{2\pi L \lambda_0}} \quad (2.3.7)$$

2.3.2 Sdílení tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním nebo-li konvekce, může být definováno jako transport tepla z jednoho místa na jiné v proudící tekutině. Existují dva základní typy konvekce a to:

- přirozená
- nucená

Konvekce přirozená má významnější vliv u stěny trubky, v jejíž blízkosti jsou rychlosti tekutiny nízké. Proudění kapaliny v tomto případě je vyvozeno jí samou. Rozdílem teplot, tím i hustot nastane pohyb kapaliny s menší hustotou směrem vzhůru a v kapalině se vytvoří proud.

Konvekce nucená probíhá působením vnější síly, která uvede tekutinu v pohyb. Tato může být vyvolána například čerpadlem.

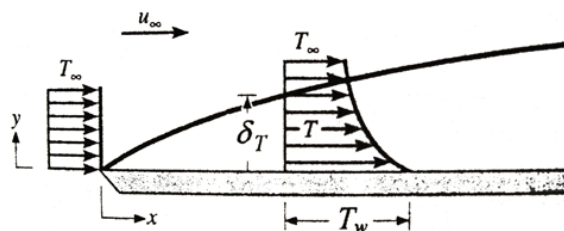
V reálných podmínkách se sdílení tepla prouděním děje složitým procesem a kombinací těchto základních typů, z nichž jeden je většinou převládající. Děj sdílení tepla probíhá dvěma způsoby. Důsledkem makroskopického pohybu tekutiny a náhodným pohybem molekul, tedy difúzí. Sdílení tepla se počítá Newtonovým zákonem, viz. rovnice (2.3.8). Součinitel přestupu tepla α je různý dle charakteru proudění a termofyzikálních vlastností tekutiny.

Jako typický příklad lze uvést proudění kapaliny, která je ohraničena trubkou. Jestliže má trubka jinou teplotu než kapalina, vznikne na jejich pomezí mezní vrstva. Tato mezní vrstva je tepelná (obr. 2.3.7), koncentrační (velmi podobná tepelné) a rychlostní (obr. 2.3.8).

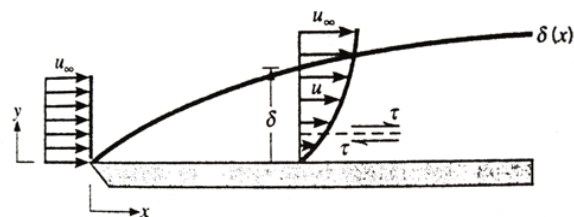
Charakteristiky těchto vrstev jsou závislé na dynamických vlastnostech proudící kapaliny. Tyto vlastnosti mají také hlavní vliv na typ proudění, které se vytvoří (obr. 2.3.9). Všechny tyto skutečnosti se promítanou do velikosti součinitele přestupu tepla. Nejdůležitější je vybrat správný z mnoha vzorců pro výpočet α , tak aby výpočtový model co nejpřesněji odpovídal skutečné situaci.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_w) \quad (2.3.8)$$

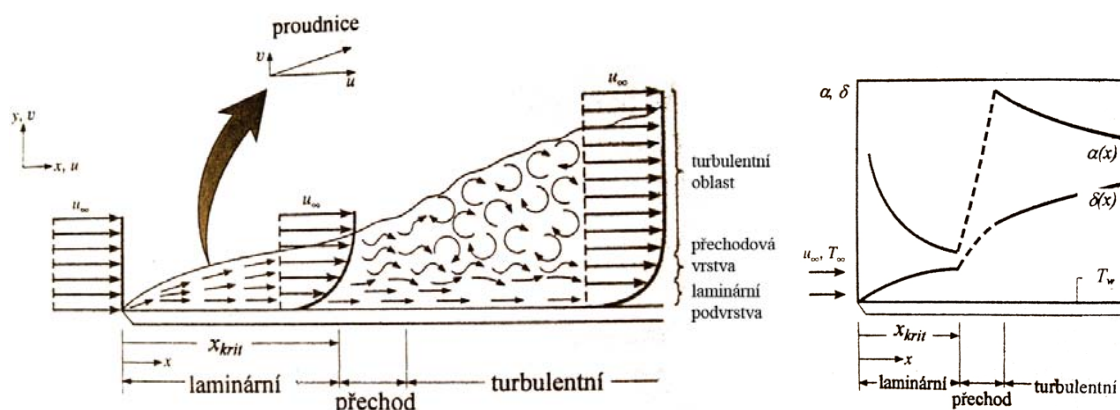
$$\begin{array}{ll} \text{kde} & \alpha \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad - \text{součinitel přenosu tepla} \\ & t_f, t_w \text{ } [^{\circ}C] \quad - \text{střední teplota proudu, střední teplota stěny trubky} \end{array}$$



Obr. 2.3.7 Teplená (koncentrační) mezní vrstva[10]



Obr. 2.3.8 Rychlostní mezní vrstva[10]



Obr. 2.3.9 Znázornění typů toku napříč tekutinou [10]

2.3.3 Součinitel přestupu tepla, kritéria podobnosti, hydraulický průměr

Jak bylo uvedeno výše, na velikost součinitele α má vliv spousta faktorů. Je funkcí mnoha proměnných. Pro jeho výpočet se používají bezrozměrná kritéria, přičemž α se vypočítá z hodnoty Nusseltova čísla dle rovnice (2.3.9).

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_h} \quad (2.3.9)$$

kde

Nu	$[-]$	- Nusseltovo podobnostní číslo
λ	$\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	- tepelná vodivost tekutiny toku
d_h	$[m]$	- hydraulický průměr

Nusseltovo číslo

Vyjadřuje poměr mezi přenosem tepla konvekcí a difúzí [10]. Nusseltovo číslo je funkční závislostí dalších bezrozměrných kritérií dle rovnice (2.3.10) [12]. Na jeho výpočet se používá řada vztahů, které se liší podmínkami použití. Obecně jde o nalezení rovnice nejlépe popisující výpočtovou situaci. Pro konkrétní použití v této diplomové práci jsou použity rovnice (2.3.11) – (2.3.12) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (2.3.10)$$

kde

C, m, n	$[-]$	- konstanty
Re	$[-]$	- Reynoldsovo číslo
Pr	$[-]$	- Prandtlovo číslo

Pro turbulentní tok v mezitrubkovém prostoru platí rovnice (2.3.11)

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (2.3.11)$$

Pro laminární tok v mezitrubkovém prostoru výměníku tepla typu trubka v trubce platí rovnice (2.3.12).

$$Nu = 3,66 + 12 \cdot \left(\frac{d_{2i}}{d_{1o}} \right)^{0,8} + \frac{0,19 \cdot \left[1 + 0,14 \cdot \left(\frac{d_{2i}}{d_{1o}} \right)^{0,5} \right] \cdot \left[Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{h2}}{L} \right]^{0,8}}{1 + 0,117 \cdot \left[Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{h2}}{L} \right]^{0,467}} \quad (2.3.12)$$

kde d_{h2} [m] - hydraulický průměr mezitrubkového prostoru
 L [m] - délka trubek

Pro laminární tok v trubkovém prostoru výměníku tepla trubka v trubce platí vztah (2.3.13). Tato korelace se nazývá též „Seider-Tate korelace“. Je určena podmínkami ($Re < 2100$) a ($0,5 < Pr < 17\,000$). Člen $\left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)$ je korekční faktor změny viskozity poblíž stěny trubky a uvnitř proudu tekutiny. Tento rozdíl má vliv na kvalitu přenosu tepla v mezních vrstvách kapaliny, viz. kapitola 2.3.2.

$$Nu = 1,86 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{h1}}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (2.3.13)$$

kde d_{h1} [m] - hydraulický průměr vnitřní trubky
 μ_w [Pa · s] - dynamická viskozita při teplotě stěny vnitřní trubky
 μ_f [Pa · s] - dynamická viskozita při teplotě proudu 1

Prandtlovo číslo

Vyjadřuje poměr mezi hybností a tepelnou difúzí mezi [10]. Jeho hodnota se vyčíslí pomocí vztahu (2.3.14).

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (2.3.14)$$

Reynoldsovo číslo

Vyjadřuje poměr setrvačných a vazkých sil [10]. Jeho hodnota je určena rovnicí (2.3.15). Toto číslo má základní vliv na rozhodování, jaký typ proudění se vyvine, viz. obr. 2.3.9.

$$Re = \frac{u \cdot d_h \cdot \rho}{\mu} \quad (2.3.15)$$

kde u [m · s⁻¹] - střední rychlost toku

Hydraulický průměr

Ve výpočtech podobnostních kritérií se vyskytuje pojem hydraulického, nebo též ekvivalentního průměru. Jde o takové číslo, které má skutečný průřez potrubí převést na ekvivalentní průřez kruhového potrubí. Toho se využívá u potrubí nekuhových a mezikružích. Přepočet se provádí pomocí obecné rovnice (2.3.16).

U výměníku trubka v trubce jsou dva průřezy kterými proudí tekutina. Hydraulický průměr vnitřní trubky bude roven jejímu vnitřnímu průměru, tedy rovnice (2.3.17). U kapaliny proudící v mezikružích, se hydraulický průměr vypočítá pomocí rovnice (2.3.18)

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{O} \quad (2.3.16)$$

kde S [m²] - protékající průřez
 O [m] - smáčený obvod

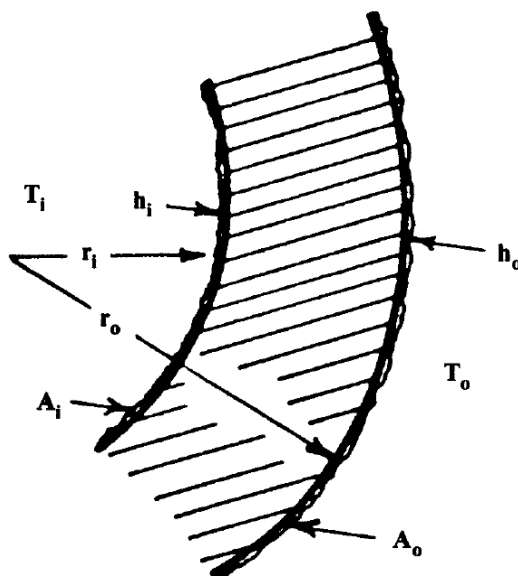
$$d_{h1} = d_{1i} \quad (2.3.17)$$

$$d_{h2} = d_{2i} - d_{1o} \quad (2.3.18)$$

kde d_{h1}, d_{h2} [m] - hydraulický průměr vnitřní trubky,
 mezitrubkového prostoru
 d_{2i}, d_{1i} [m] - vnitřní průměry trubek
 d_{1o} [m] - vnější průměr vnitřní trubky

2.4 Součinitel prostupu tepla

Na obrázku 2.4.1 je znázorněna stěna trubky. Je dáno, že uvnitř proudí teplejší látka o teplotě T_i a na vnější straně chladnější o teplotě T_o . Pak přestup tepla z teplejší látky nastává uvnitř této látky, kde dochází ke konvekci tepla. Poté teplo prostupuje mezní vrstvou na vnitřní straně trubky, což je vrstva v blízkosti stěny trubky, kde přenos tepla probíhá složitým způsobem, viz. 2.3.3. Popřípadě ještě vrstvou usazenin. Dále teplo prostupuje stěnou trubky k její vnější stěně a poté analogicky vrstvou usazenin, mezní vrstvou chladnější látky a samotnou látkou. Je tedy vidět, že přenos tepla z jedné látky do druhé je značně složitý děj. [9]



Obr. 2.4.1 Průřez stěnou trubky při prostupu tepla z jedné pracovní látky do druhé

Pro jednotlivé vrstvy platí rovnice (2.4.1), (2.4.2) a (2.4.3). Rovnice (2.4.1) vyjadřuje přenos tepla prouděním v tekutině uvnitř trubky. Následuje přenos tepla vedením stěnou trubky dle rovnice (2.4.2). Nakonec opět rovnice pro přenos tepla prouděním v tekutině vně trubky dle rovnice (2.4.3).

$$\dot{Q} = A_i \cdot \alpha_i \cdot (T_i - T_{iw}) \quad (2.4.1)$$

$$\dot{Q} = A_w \cdot \frac{\lambda_w}{s_w} \cdot (T_{iw} - T_{ow}) \quad (2.4.2)$$

$$\dot{Q} = A_o \cdot \alpha_o \cdot (T_{ow} - T_o) \quad (2.4.3)$$

kde A_i, A_w, A_o [m^2] - plochy výměny tepla viz. obr 2.4.1
 T_{xx} [$^{\circ}C$] - teploty viz. obr 2.4.1
 λ_w [$\frac{W}{m \cdot K}$] - tepelná vodivost materiálu stěny trubky
 s_w [m] - tloušťka stěny trubky

Pro celkové přenesené teplo u výměníku tepla platí rovnice (2.4.4). Ta říká, že tepelný výkon se rovná součinu velikosti plochy výměny tepla A , součinitele prostupu tepla k a středního teplotního rozdílu ΔT_{ln} . Součinitel prostupu tepla je hodnota, která v sobě zahrnuje všechny vlivy na velikost tepelného výkonu výměníku a způsoby přenosu tepla. Je to tedy součinitel popisující celý komplexní problém prostupu tepla.

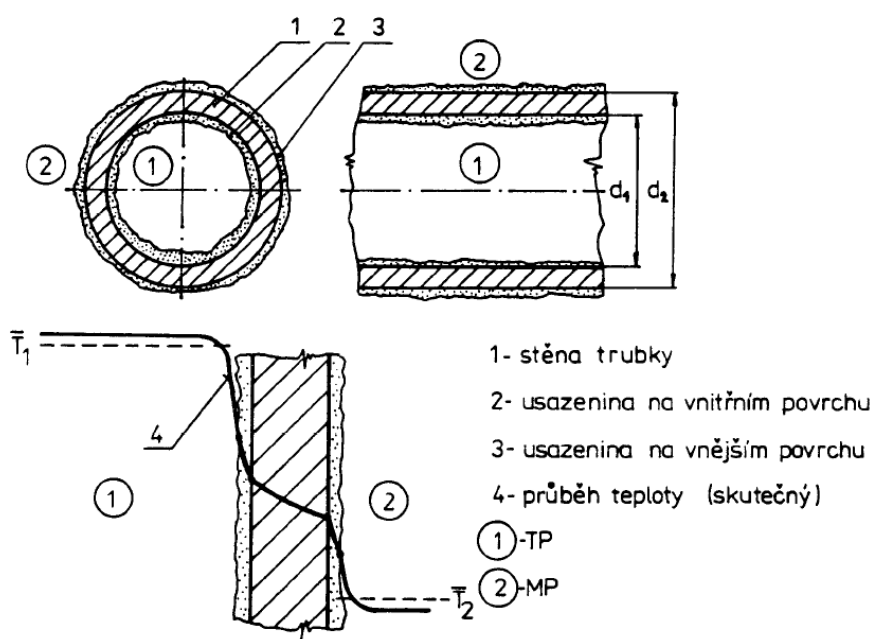
$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T_{ln} \quad (2.4.4)$$

kde k [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] - součinitel prostupu tepla
 A [m^2] - referenční plocha výměny tepla
 ΔT_{ln} [$^{\circ}C$] - střední logaritmický teplotní spád

2.5 Součinitel zanášení

Jak je patrné z obrázku 2.5.1, v případě nánosu na ploše výměny tepla, vystupuje v mechanismu prostupu tepla ještě navíc tato vrstva usazenin. Ve většině skutečných výměníků tento jev zanášení nastává. Děje se tak sedimentací pevných částí, růstem organických usazenin a korozí.

Usazeniny jsou samostatnou vrstvou, kterou musí teplo projít. Výpočet této vrstvy nemůže být proveden podle vztahu pro prostou kondukcí tepla. Jen velmi zřídka známe detailní informace o vrstvě nánosu. Proto řeší tuto situaci inženýrská praxe zavedením součinitele zanášení R_f . Ten je definován na základě tepelného toku Q/A a teplotního rozdílu ve vrstvě nánosu dle rovnice (2.4.4). V důsledku zanášení se snižuje výkon výměníku. To je důvod zavedení součinitele zanášení do příslušných rovnic pro výpočet tepelného toku.



Obr. 2.5.1 Ukázka zanášení a změny teplotního profilu v jeho důsledku [4]

$$R_f = \frac{\Delta T_f}{\dot{q}} \quad (2.5.1)$$

kde $R_f \left[\frac{^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \right]$ - součinitel zanášení

$\dot{q} \text{ [W/m}^2\text{]}$ - měrný tepelný tok

$\Delta T_f \text{ [}^\circ\text{C]}$ - teplotní difference ve vrstvě nánosu

2.6 Výpočet součinitele prostupu tepla

Kombinací rovnic (2.4.1), (2.4.2), (2.4.3) vznikne výsledná rovnice prostupu tepla od teplejší látky k chladnější, tedy rovnice (2.6.1). Její úpravou a vztažením na referenční plochu získá tvar (2.6.2). Zde byla jako referenční plocha výměny tepla použita válcová plocha A_o . Průměr plochy A_o se rovná vnějšímu průměru vnitřní trubky výměníku tepla.

$$\dot{Q} \cdot \left(\frac{1}{A_i \cdot \alpha_i} + \frac{1}{A_w \cdot \frac{\lambda_w}{s_w}} + \frac{1}{A_o \cdot \alpha_o} \right) = T_i - T_o \quad (2.6.1)$$

$$\dot{Q} = A_o \cdot \left(\frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \cdot \alpha_i} + \frac{1}{\frac{A_o}{A_w} \cdot \frac{s_w}{\lambda_w}} + \frac{1}{\alpha_o} \right) \cdot (T_i - T_o) \quad (2.6.2)$$

Porovnáním rovnic (2.6.2) a (2.4.4) nebo (1.3.1) je zřejmá jejich vzájemná ekvivalence. Díky tomuto lze odvodit, že součinitel prostupu tepla k se rovná pravé straně rovnice (2.6.3).

$$k = \left(\frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \cdot \alpha_i} + \frac{1}{\frac{A_o}{A_w} \cdot \frac{s_w}{\lambda_w}} + \frac{1}{\alpha_o} \right) \quad (2.6.3)$$

Pro trubkový výměník lze rovnici (2.6.3) přepsat do tvaru rovnice (2.6.4), jenž uvažuje i se zanášením. [4]

$$k = \left(\frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + R_{fi} \right) + \frac{d_o}{2 \cdot \lambda_w} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i} + \left(\frac{1}{\alpha_o} + R_{fo} \right)} \right) \quad (2.6.4)$$

2.7 Rovnice pro výpočet tlakových ztrát

Tlaková ztráta je různá pro trubkový i mezitrubkový prostor. Je tedy nutné vždy zvolit rovnici, která nejvíce odpovídá danému prostoru, pro který se počítá. Celková tlaková ztráta se v obecném případě vypočítá dle rovnice (2.7.1). Tlakové ztráty se vždy vyšetřují mezi dvěma místy. Například mezi vstupem (místo 1) a výstupem (místo 2). Člen 1 v rovnici (2.7.1) vyjadřuje statickou složku celkových ztrát. Členy 2 a 3 pak složky dynamickou a gravitační. U těchto dvou posledně zmiňovaných lze vidět, že nebude-li docházet k větším změnám v hustotě tekutiny, jsou příspěvky těchto složek zanedbatelné. Navíc člen 3 je výraznější, až při větších výškových rozdílech, což vede často k zanedbání obou těchto členů v případech výpočtů výměníků typu trubka v trubce. [2]

$$\Delta p_{zc} = \underbrace{(p_1 - p_2)}_1 + \underbrace{\frac{\rho_1 \cdot u_1^2}{2} - \frac{\rho_2 \cdot u_2^2}{2}}_2 + \underbrace{g \cdot (h_1 \cdot \rho_1 - h_2 \cdot \rho_2)}_3 \quad (2.7.1)$$

kde	Δp_{zc} [Pa]	- celková tlaková ztráta
	p_1, p_2 [Pa]	- tlaky v místě 1 a 2
	ρ_1, ρ_2 [kg/m ³]	- hustoty tekutiny v místech 1 a 2
	u_1^2, u_2^2 [m/s]	- rychlosti tekutiny v místech 1 a 2
	g [m/s ⁻²]	- gravitační zrychlení

$$h_1, h_2 \quad [m] \quad - \text{výška od referenční polohy místa 1 a 2}$$

Statické ztráty, člen 1 v rovnici (2.7.1) se dále dělí na tlakové ztráty třením Δp_t a ztráty místní Δp_m . Celková velikost tlakových ztrát se zanedbáním členů 2 a 3 z rovnice (2.7.1) se rovná součtu velikostí obou těchto typů, jak je uvedeno v rovnici (2.7.2)

$$\Delta p_{zC} = \Delta p_t + \Delta p_m \quad (2.7.2)$$

Tlakové ztráty třením

Pro *laminární proudění* newtonské tekutiny v přímé trubce kruhového průřezu s absolutní drsností stěny trubky $\varepsilon \leq 0,05$ byl odvozen vzorec (2.7.3) pro výpočet tlakových ztrát třením. Tento vzorec odpovídá realitě s odchylkou menší než 1%. Součinitel tření λ_{zt} vyjadřuje vliv charakteristik potrubí na velikost tlakové ztráty. Tento součinitel závisí na charakteru toku, který je ve vzorci zastoupen *Reynoldsovým číslem*. Jiný je pro turbulentní proudění, jak je uvedeno dále. [14].

$$\Delta p_t = \lambda_{zt} \cdot \frac{L}{d_h} \frac{u^2}{2} \cdot \rho \quad (2.7.3)$$

kde	λ_{zt}	$[-]$	- součinitel tření
	ρ	$[kg / m^3]$	- hustota tekutiny
	L	$[m]$	- délka trubky
	d_h	$[m]$	- hydraulický průměr potrubí
	u	$[m / s]$	- rychlost proudění tekutiny

Součinitel tření pro laminární tok se vypočítá pomocí rovnice (2.7.4). Tento vztah platí pro potrubí tvořené hladkými trubkami kruhového tvaru pro $Re < 2320$ [14].

$$\lambda_{zt} = \frac{64}{Re} \quad (2.7.4)$$

Tlakové ztráty u *turbulentního proudění* vznikají vlivem tečného napětí, které při tomto typu proudění vzniká. Jeho hodnota je větší, než v případě laminárního toku. Takové ztráty turbulentního proudění se počítají pomocí *Darcy-Weisbachovy rovnice*. Rovnice pro výpočet tlakové ztráty má totožný tvar s rovnicí (2.7.3). Změna nastává ve výpočtu součinitele tření λ_{zt} . Ten je dle rovnice (2.7.5) funkcí dvou proměnných [14].

$$\lambda = f(Re, k_r) \quad (2.7.5)$$

kde	k_r	$[-]$	- relativní drsnost stěny potrubí
-----	-------	-------	-----------------------------------

Relativní drsnost k_r se vypočítá dle rovnice (2.7.6)

$$k_r = \frac{\varepsilon}{d} \quad (2.7.6)$$

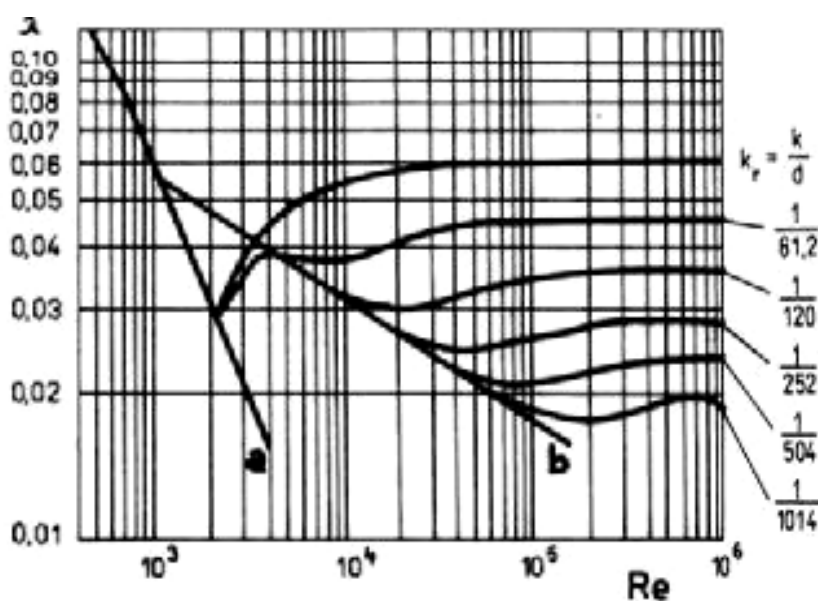
kde	ε	$[m]$	- absolutní drsnost stěny potrubí
	d	$[m]$	- hydraulický průměr potrubí

Důležité je opět zvolení vzorce, který co nejpřesněji popisuje reálnou situaci. Tyto lze nalézt v odborné literatuře. Pro hladké potrubí byl odvozen *Blasiův vzorec*, viz. rovnice (2.7.7). Tato rovnice platí pro $(2300 \leq Re \leq 8 \cdot 10^4)$ [14]

$$\lambda = \frac{0,3164}{4\sqrt{Re}} \quad (2.7.7)$$

Pro dokonale vyvinuté turbulentní proudění vyjádřil *Nikuradse* vzorec (2.7.8), který sledoval i vliv drsnosti [14].

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \cdot \log \frac{d}{k} + 1,138\right)^2} \quad (2.7.8)$$



Obr. 2.7.1 Nikuradseho diagram $\lambda = (Re, \varepsilon/d_h)$

Vliv drsnosti potrubí vyšetřoval Nikuradse v letech 1930 až 1933. V experimentech použil bronzové potrubí kruhového průřezu o různých průměrech. Nejprve provedl měření v hladkém potrubí. Potom měnil drsnost potrubí nalepením třídných pískových zrn. Výsledky měření jsou uvedeny v diagramu na obr. 2.7.1 [14].

Křivky pro různé poměrné drsnosti k_r se odpoutávají od přímky Blasiovy, která představuje průběh součinitele tření pro hladké potrubí. S rostoucím Reynoldsovým číslem přecházejí v soustavu čar rovnoběžných s vodorovnou osou. Z diagramu je patrné, že od určitého Reynoldsova čísla, které závisí na poměrné drsnosti, má součinitel tření hodnotu stálou a nezáleží na Re [14].

Lze použít i *Moodyho diagram*. Z něj pak lze vyjádřit λ pro turbulentní režim proudění pomocí rovnice 2.7.9. Na obrázku 2.7.2 jsou uvedeny hodnoty absolutních drsností pro některé běžně používané materiály.

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \cdot \log \left[\left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} + \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d_h} \right]} \right)^2 \quad (2.7.9)$$

Absolutní drsnost potrubí ε pro různé materiály	
Materiál	ε [mm]
beton drsný	1,0 - 3,0
beton hlazený	0,3 - 0,8
dřevo	0,2 - 2,5
litina asfaltovaná	0,1 - 0,2
litina mírně zkorodovaná	1,0 - 1,5
litina nová	0,3 - 1,0
litina značně zkorodovaná	1,5 - 3,0
ocel bežešvá, mírně zkorodovaná	0,2 - 0,3
ocel bežešvá, nová	0,1 - 0,2
ocel bežešvá, značně zkorodovaná	0,5 - 1,0
ocel nýtovaná	0,9 - 9,0
pozinkované trubky	0,1 - 0,2
sklo	0
tažené měděné, olověné a mosazné trubky	0,01 - 0,05

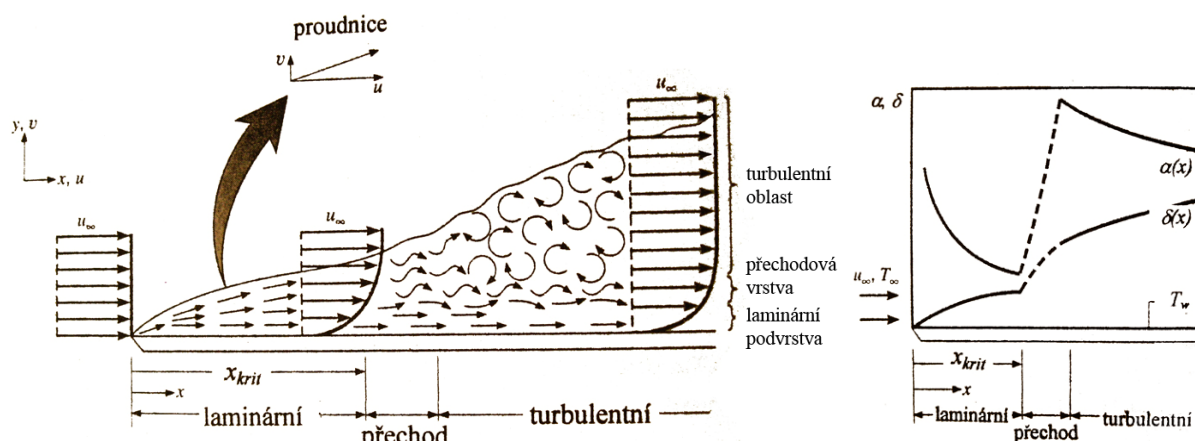
Obr. 2.7.2 Hodnoty absolutních drsností běžně používaných materiálů [4]

3 Odvození postupu výpočtu charakteristik důležitých pro výběr vhodného uspořádání toku tekutin

V této kapitole bude předveden postup, jakým lze provést návrhový, nebo kontrolní výpočet výměníku tepla typu trubka v trubce. Tyto výpočty budou mít základní vliv na rozhodnutí, které uspořádání bude v závislosti na konkrétním případě vhodnější. Postup výběru vhodnějšího charakteru bude probrán dále v této práci. V jednotlivých typech výpočtu budou rozebrány odlišnosti v přístupu k výpočtu v případě souproutého, nebo protiproutého uspořádání viz. kapitola 1.3.

3.1 Faktory ovlivňující charakter toku tekutiny

Základním kritériem je v této práci požadavek na laminární tok. Kritérium, podle kterého se o tomto rozhoduje, je nazýváno *Reynoldsovo*. Je to bezrozměrné číslo a jeho hodnota udává, zda tok bude *turbulentní*, *laminární*, nebo bude ležet v *přechodové* oblasti. To je názorně vidět na obr. 3.1.1. Experimentálním pozorováním zjistil fyzik *Osborne Reynolds*, že vyvinuté turbulentní proudění se ustaví v trubici, jestliže hodnota rov. 3.1.1 bude minimálně 2300. Toto číslo se značí jako tzv. kritická hodnota Reynoldsova čísla [11]. V dalším textu bude uvažován vliv různých faktorů na velikost Reynoldsova čísla.



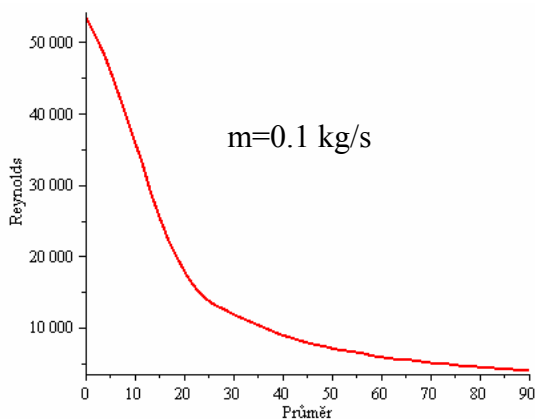
Obr. 3.1.1 Znárodnění typů toku napříč tekutinou [10]

$$\frac{c_{stř} \cdot d}{\nu} \cong 2300 = Re_{krit} \quad (3.1.1)$$

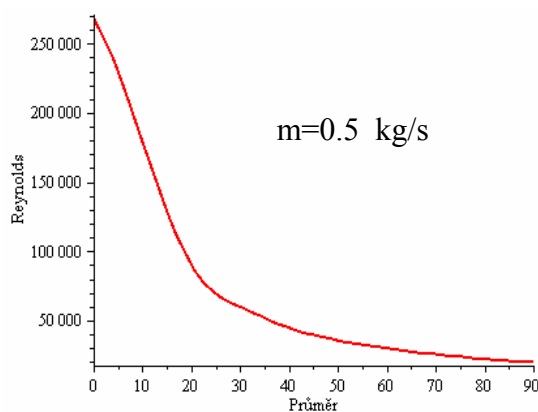
kde $c_{stř}$ [$m \cdot s^{-1}$] - střední rychlost proudící kapaliny
 d_h [m] - hydraulický průměr potrubí
 ν [$m^2 \cdot s^{-1}$] - kinematická viskozita tekutiny

3.1.1 Hmotnostní tok, hydraulický průměr

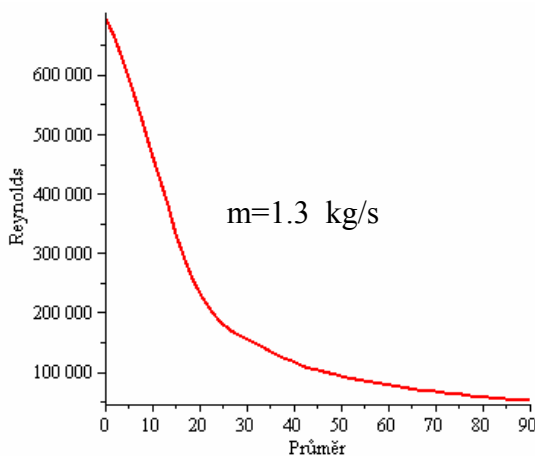
Grafy na obrázcích 3.1.2 – 3.1.5 znázorňují závislost Reynoldsova čísla na velikosti hydraulických průměrů d_h [mm]. Toto je uvažováno při různých hmotnostních tocích m [kg/s] u vody při střední teplotě toku $80^\circ C$. Velmi podobný průběh mají i grafy dalších tekutin, které jsou uvedeny v přílohách. Z grafů lze vyčíst, že od průměru kolem $40mm$ směrem k vyšším hodnotám, je pokles vzhledem k maximální hodnotě Reynoldsova čísla již mírný.



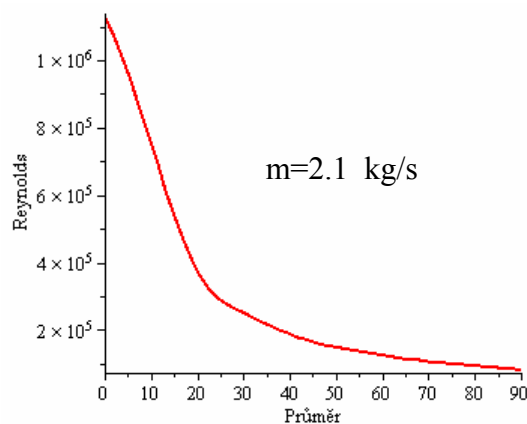
Obr. 3.1.2 Závislost Re na d_h při $m=0.1$ kg/s



Obr. 3.1.3 Závislost Re na d_h při $m=0.5$ kg/s



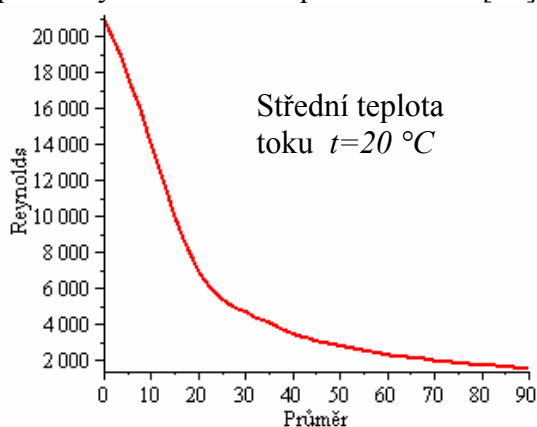
Obr. 3.1.4 Závislost Re na d_h při $m=1.3$ kg/s



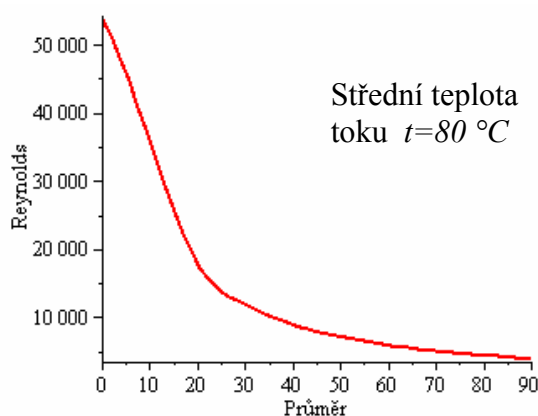
Obr. 3.1.5 Závislost Re na d_h při $m=2.1$ kg/s

3.1.2 Teplota, hydraulický průměr

Grafy zobrazující vliv průměru d_h [mm] na velikost Re při hmotnostním toku $m = 0.1$ kg/s při různých středních teplotách toků t [°C] u vody.



Obr. 3.1.6 Závislost Re na d_h , $m=0.1$ kg/s

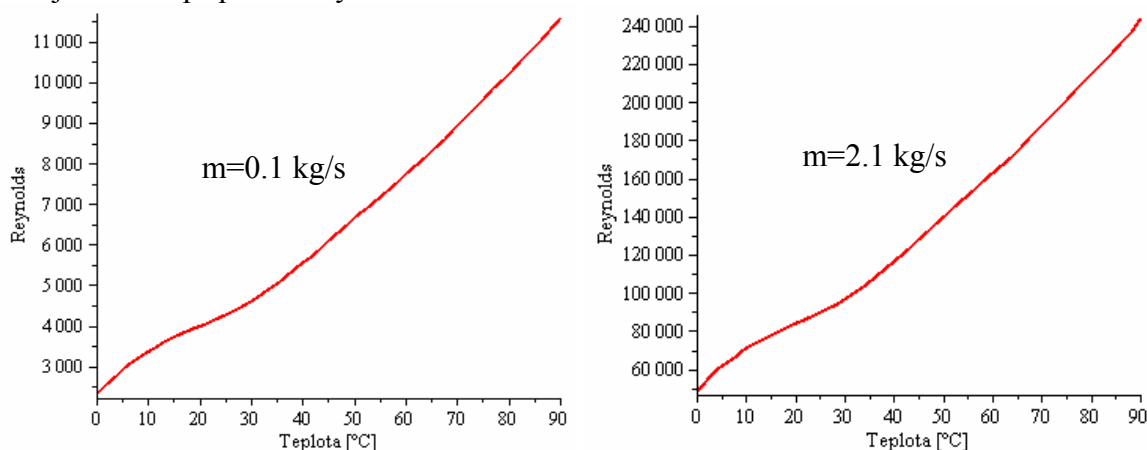


Obr. 3.1.7 Závislost Re na d_h , $m=0.1$ kg/s

3.1.3 Hmotnostní tok, teplota

Grafy zobrazující vliv teploty t [°C] na velikost Re při hydraulickém průměru $d_h=35$ mm při různých hmotnostních tocích m [kg/s] u vody. Ostatní tekutiny mají tvar grafu

trochu odlišný. U vzduchu pak graf této závislosti má charakter klesající, nikoliv stoupající, jako je tomu v případě vody.



Obr. 3.1.6 Závislost Re na t , $d_h=35$ mm Obr. 3.1.7 Závislost Re na t , $m=2.1$, $d_h=35$ mm

3.2 Metody řešení kontrolního výpočtu

Kontrolní výpočet se používá v případě existujícího výměníku, který má být použit v nových provozních podmínkách. A úkolem je zjistit jak by se v těchto podmínkách choval. Zejména pak velikost jeho výkon. Je známa geometrie výměníku a některé charakteristiky toků pracovních látek. Většinou se v tomto typu výpočtu určuje tepelný výkon výměníku a výstupní teploty jednotlivých proudů. Dva základní přístupy řešení kontrolního výpočtu jsou uvedeny dále.

3.2.1 Popis metody ε -NTU

ε v názvu této metody označuje efektivnost výměníku. NTU pak značí *Number of Transfer Units*. Tuto metodu vynalezli Kays a London (1964). Její princip spočívá ve stanovení maximálního možného výkonu výměníku tepla. Jako takový se stanovuje výkon výměníku o nekonečné délce. V tomto případě dosáhne buď horký proud na výstupu teploty shodné se vstupní teplotou studeného proudu, nebo naopak chladný proud dosáhne na výstupu teploty shodné se vstupní teplotou horkého proudu.

Jeden tok tedy podstoupí maximální možnou teplotní diferenci. Tato se bude používat do rovnice maximálního přenášeného teplotního výkonu. Pro tento výkon byl odvozen vzorec (3.2.1), kde C_{\min} se vypočítá podle rovnice (3.2.2) [10]

$$\dot{Q}_{\max} = C_{\min} \cdot (T_{h,in} - T_{s,in}) \quad (3.2.1)$$

$$C_{\min} = \min \{C_h, C_c\} = \min \{c_{p_{stř,h}} \cdot \dot{m}_h, c_{p_{stř,c}} \cdot \dot{m}_c\} \quad (3.2.2)$$

kde \dot{Q}_{\max} [W] - maximální teoretický výkon výměníku
 C_{\min} [J/(K·s)] - minimální tepelná kapacita proudu
 C_h, C_c [J/(K·s)] - tepelná kapacita horkého, chladného proudu
 $c_{p_{stř,h}}, c_{p_{stř,c}}$ $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ - měrná tepelná kapacita horkého, chladného proudu
 \dot{m}_h, \dot{m}_c [kg/s] - hmotnostní tok horkého, chladného proudu

$$T_{h,in}, T_{s,in} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad - \text{vstupní teplota horkého, chladného toku}$$

Efektivnost ε pak bude poměr skutečně přenášeného výkonu a výkonu maximálního. Bez znalosti všech vstupních a výstupních teplot ale nemůže být spočítán skutečně přenášený výkon výměníku tepla běžnými způsoby. V této metodě se ale skutečný výkon spočítá dle rovnice (3.2.3). [10]

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \dot{Q}_{\max} = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{h,in} - T_{s,in}) \quad (3.2.3)$$

kde ε [-] - efektivita výměníku

Vystupuje zde tedy jediná neznámá a to právě efektivnost výměníku. Ta je dána, jako funkční závislost dle rovnice (3.2.4), kde C_{\max} se vypočítá dle rovnice (3.2.5) a C_{\min} dle rovnice (3.2.2), viz. výše [10]. Jde pak o spočítání NTU , poměru kapacit a určení efektivnosti z příslušných grafů, které byli pro tuto metodu pro různé typy výměníku sestaveny. Určení \dot{Q}_{\max} , \dot{Q} výstupních teplot obou proudů. Tato práce se dále již výhradně metodou využívající střední logaritmický teplotní spád, která je uvedena v další kapitole.

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad (3.2.4)$$

$$C_{\max} = \max\{C_h, C_c\} = \max\{c_{p_{stř,h}} \cdot \dot{m}_h, c_{p_{stř,c}} \cdot \dot{m}_c\} \quad (3.2.5)$$

kde C_{\max} [J/(kg · s)] - maximální tepelná kapacita toku

3.2.2 Popis metody využívající střední logaritmický teplotní spád

Střední logaritmický teplotní spád byl popsán v kapitole 1.4. Z definice plyne, že k jeho určení je potřeba znát vstupní a výstupní teploty tekutiny. Ty však v případě kontrolního výpočtu nejsou zpočátku známy. Získají se pomocí iteračního cyklu. Postup kontrolního výpočtu je uveden v následujících bodech:

Bod 1. Nástřel jedné z výstupních teplot, tepelný tok

Zvolí se výstupní teplota proudu 1. Pro tuto teplotu se vypočítá tepelný tok, který by proud přenášel, z bilanční rovnice (2.1.1).

Bod 2. Výpočet druhé výstupní teploty

Druhá výstupní teplota se počítá iteračním způsobem. Jde o to nalézt takovou teplotu, aby se tepelné výkony obou proudů rovnali.

Bod 3. Výpočet ostatních charakteristik

Určení středních teplot proudů a vyčíslení termofyzikální vlastnosti pro tyto teploty. Z těchto se dále vypočítají podobnostní kritéria, hodnoty součinitelů přenosu a prostupu tepla.

Bod 4. Výpočet $\Delta \bar{T}_{\ln}$ a tepelného toku

V tomto bodě se vyčíslí hodnota středního logaritmického teplotního rozdílu. Poté se s jeho pomocí vypočítá reálný tepelný výkon, který je výměník schopen přenést v závislosti na

zvolených výstupních teplotách a charakteristikách proudů. Toto se provede pomocí rovnice (2.4.4)

Bod 5. Hodnocení výsledků

V bodě 1 byl proveden hrubý odhad teploty jednoho z proudů. Tímto způsobem se zanesla nepřesnost do celého výpočtu. Tuto nepřesnost signalizuje rozdílná hodnota velikosti tepelných toků v bodě 1 a 4. Musí být tedy provedeno zpřesnění teploty v kroku 1 v závislosti na velikosti tepelného toku v bodě 4. Poté se celý proces výpočtu opakuje až do bodu 5. Tento kontrolní výpočet skončí a může být považován za správný až případě rovnosti obou těchto tepelných toků.

3.3 Detailní popis kontrolního výpočtu výměníku tepla s laminárním tokem

Účelem této práce je výběr vhodného uspořádání v případě laminárního toku tekutiny v trubkovém výměníku tepla. Byli uvažovány dvě kombinace proudění a to:

- Laminární charakter toku média ve vnitřní trubce spolu s turbulentním charakterem toku média v mezitrubkovém prostoru.
- Laminární charakter toku média ve vnitřní trubce spolu s laminárním charakterem toku média v mezitrubkovém prostoru.

V této kapitole bude probrán jeden z nich. Řešení druhého bude uvedeno dále. Rozdíl mezi nimi je v odlišném přístupu k přenosu tepla v mezitrubkovém prostoru.

V následujících podkapitolách bude uveden konkrétní příklad výpočtu výměníku tepla. Bude použita metoda využívající střední logaritmický teplotní spád. Přímou v textu budou probírány odlišnosti v případě souprůdého, či protiprůdého uspořádání.

3.3.1 Zadané údaje

Uvažován je výměník typu trubka v trubce s hladkými trubkami. Médium ve vnitřní trubce proudí laminárním tokem. Médium v mezitrubkovém prostoru proudí turbulentním tokem. Teplejší tekutina je v trubkovém prostoru, označena je jako 1. Naopak označení 2 ponese médium v mezitrubkovém prostoru výměníku.

Podstata kontrolního výpočtu je v kontrole stávajícího výměníku tepla pro nové provozní podmínky. Jako zadané vstupní hodnoty můžeme považovat kompletní geometrii výměníku tepla. Navíc vstupní teploty obou proudů a jejich hmotnostní toky. Jsou tedy zadány tyto hodnoty:

$$\dot{m}_1, \dot{m}_2, t_{11}, t_{21}, \lambda, d_{1i}, d_{2i}, t_{s1}, R_{f1}, R_{f2}, l, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \Delta p_1, \Delta p_2$$

kde	\dot{m}_1, \dot{m}_2	$[\text{kg} / \text{s}]$	- hmotnostní toky média 1 a média 2
	t_{11}, t_{21}	$[^{\circ}\text{C}]$	- teploty média 1 a média 2 v místě vstupu
	λ	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	- tepelná vodivost materiálu stěny trubky
	d_{1i}, d_{2i}	$[\text{m}]$	- vnitřní průměry vnitřní a vnější trubky

t_{s1} [m]	- tloušťka stěny trubky 1
R_{f1}, R_{f2} $\left[\frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \right]$	- součinitele zanášení
l [m]	- délka trubek
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ [m]	- absolutní drsnost vnitřní a vnější trubky
$\Delta p_1, \Delta p_2$ [Pa]	- dovolené tlakové ztráty proudů 1 a 2

3.3.2 Plocha výměny tepla, hydraulické průměry

Ze zadaných hodnot se vypočítá plocha výměny tepla dle rovnice (3.3.2). Jako tato byla určena válcová plocha o průměru rovnajícím se vnějšímu průměru vnitřní trubky. Tento průměr se vypočítá dle rovnice (3.3.1). Problematika stanovení této referenční plochy výměny tepla byla probrána v kapitole 2.6

$$d_{1o} = d_{1i} + 2 \cdot t_{s1} \quad (3.3.1)$$

kde d_{1o} [m] - vnější průměr vnitřní trubky

$$A = \frac{\pi \cdot d_{1o}^2}{4} \cdot l \quad (3.3.2)$$

kde A [m²] - plocha výměny tepla

3.3.3 Odhad výstupní teploty proudu 1, tepelný výkon proudu

Odhad výstupní teploty se provede například rovnicí (3.3.3). Díky této hodnotě lze vyčíslit tepelný výkon tohoto toku. Ten se přepíše z obecné rovnice (2.1.1) do tvaru (3.3.4). Zbývá vyčíslit poslední neznámou \bar{c}_{p1} . Problematika toho výpočtu byla probrána dříve, provede se tedy její vyčíslení dle rovnice (3.3.5).

$$t_{12} = \frac{(t_{11} + t_{21})}{2} \quad (3.3.3)$$

kde t_{12} [°C] - výstupní teplota proudu 1 (trubkový prostor)

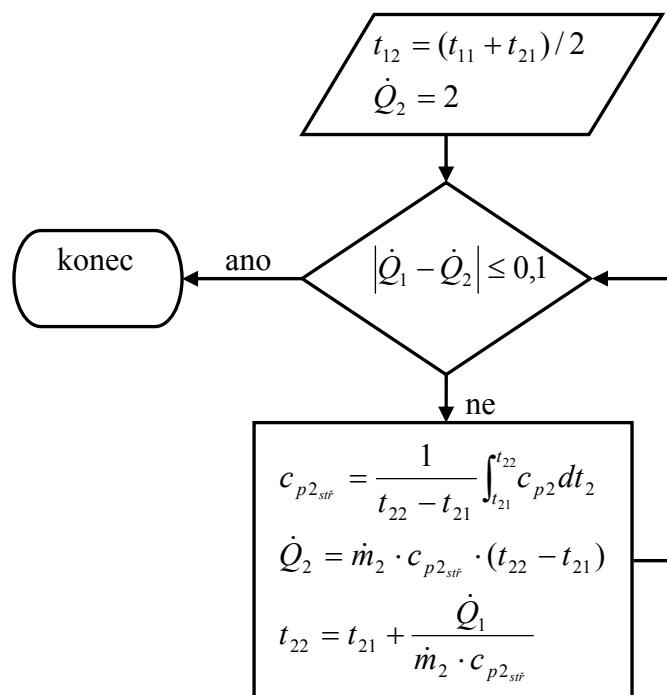
$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p_{stf1}} \cdot (t_{11} - t_{12}) \quad (3.3.4)$$

kde \dot{Q}_1 [W] - tepelný tok přenášený horkým proudem
 \dot{m}_1 [kg/s] - hmotnostní tok horkého proudu
 $c_{p_{stf1}}$ [J/(kg·K)] - střední měrná tepelná kapacita horkého proudu

$$c_{p_{stf1}} = \frac{1}{t_{11} - t_{12}} \int_{t_{12}}^{t_{11}} c_{p1} dt_1 \quad (3.3.5)$$

3.3.4 Výpočet výstupní teploty druhého proudu

Tepelní toky obou proudů musí být dle tepelné bilance shodné, viz. rovnice (2.2.1). Iteračním způsobem se dopočítá výstupní teplota druhého proudu. To se provede dle schématu na obrázku 3.3.1. Jako počáteční hodnoty použijeme nastřelenou hodnotu t_{12} z rovnice (3.3.3) a libovolnou hodnotu tepelného toku \dot{Q}_2 . Zde například zvolíme 2 W.



Obr. 3.3.1 Vývojový diagram výpočtu chybějící výstupní teploty

3.3.5 Výpočet termofyzikálních vlastností tekutin obou proudů

V tento okamžik jsou známy vstupní i výstupní teploty obou proudů. Určí se jejich střední teploty dle rovnice (3.3.6). Pro tyto se naleznou termofyzikální vlastnosti tekutin obou proudů, potřebné pro další výpočty. Mezi tyto patří hustota, dynamická viskozita, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita $\rho_1, \rho_2, \eta_1, \eta_2, \lambda_1, \lambda_2, c_{p1}, c_{p2}$

3.3.6 Výpočet procesních charakteristik

Jedná se o vyčíslení bezrozměrných podobnostních kritérií *Reynoldsova*, *Prandtlovo*, a *Nusseltova*. viz. kapitola 2.3.3 dle rovnic (3.3.6) – (3.3.8). U *Nusseltova čísla* jsou uvedeny dva vztahy. Ve výpočtech použitých v této práci byli použity i další. Musí být vybrán nejvhodnější vztah dle charakteru toku. Vysvětlení bylo v kapitole 2.3.3. Ve vzorci pro výpočet Nu_1 je uveden v závorce člen $\left(\frac{\mu_1}{\mu_{w1}}\right)^{0,14}$. Tento vyjadřuje dopad změny velikosti dynamické viskozity v blízkosti stěny trubky na velikost *Nusseltova čísla*. To má vliv i na součinitel přestupu a prostupu tepla. V konečném důsledku i na výkon výměníku tepla. μ_{w1} je dynamická viskozita v těsné blízkosti stěny trubky. Výpočet této teploty je uveden dále.

$$Pr_1 = \frac{\mu_1 \cdot c_{p1}}{\lambda_1} \quad Pr_2 = \frac{\mu_2 \cdot c_{p2}}{\lambda_2} \quad (3.3.6)$$

$$Re_1 = \frac{u_1 \cdot d_{h1} \cdot \rho_1}{\mu_1} \quad Re_2 = \frac{u_2 \cdot d_{h2} \cdot \rho_2}{\mu_2} \quad (3.3.7)$$

$$Nu_1 = 1,86 \cdot \left(Re_1 \cdot Pr_1 \cdot \frac{d_{h1}}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_{w1}} \right)^{0,14} \quad Nu_2 = 0,023 \cdot Re_2^{0,8} \cdot Pr_2^{0,4} \quad (3.3.8)$$

3.3.7 Výpočet tlakových ztrát

V tomto kroku se vypočítají tlakové ztráty vnitřní trubky a mezitrubkového prostoru. Jsou použity vztahy odvozené v kapitole 2.7. Opět jako v předchozím případě se musejí vybrat vztahy nejlépe popisující danou situaci. Pro vnitřní trubku je vždy ve výpočtech použit vztah (3.3.9), protože se uvažuje hladké potrubí s laminárním režimem toku. Pro mezitrubkový prostor v případě média proudícího turbulentním tokem je použita rovnice (3.3.10).

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (3.3.9)$$

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \cdot \log \left[\left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} + \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot dh} \right]} \right)^2 \quad (3.3.10)$$

3.3.8 Výpočet součinitelů přenosu tepla a součinitele prostupu tepla

Oba součinitelé přenosu tepla α se určí z *Nusseltova čísla* dle rovnic (3.3.11). Poté již může být vyčíslen součinitel prostupu tepla k . Pro válcovou stěnu s uvažováním zanášení se jedná o rovnici (3.3.12), viz. kapitoly 2.4 a 2.6. V tuto chvíli ještě není vyčíslen člen Nu_l . Výpočet tohoto členu je popsán v další podkapitole.

$$\alpha_1 = Nu_1 \cdot \frac{\lambda_1}{d_{h1}} \quad \alpha_2 = Nu_2 \cdot \frac{\lambda_2}{d_{h2}} \quad (3.3.11)$$

$$k = \left(\frac{1}{\frac{d_{lo}}{d_{li}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{f1} \right) + \frac{d_{lo}}{2 \cdot \lambda_w} \cdot \ln \frac{d_{lo}}{d_{li}} + \left(\frac{1}{\alpha_2} + R_{f2} \right)} \right) \quad (3.3.12)$$

3.3.9 Výpočet teploty stěny vnitřní trubky

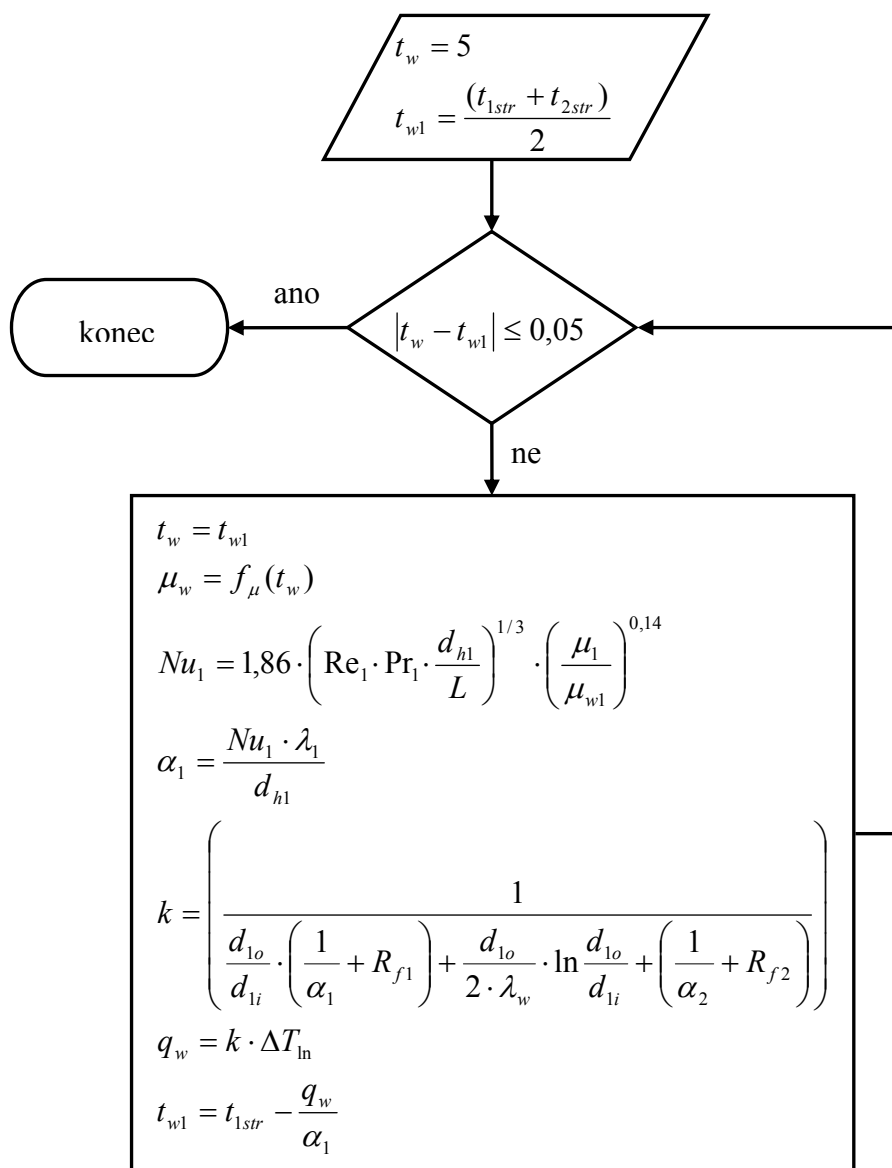
V bodě 3.3.6 nemohlo být vyčísleno *Nusseltovo číslo* vnitřního toku. Pro jeho dopočet je potřeba stanovit teplotu stěny vnitřní trubky. Pro tu je poté nalezena hodnota dynamické viskozity a výpočet může pokračovat od bodu 3.3.6.

Vychází se z rovnice měrného tepelného výkonu při přestupu tepla (3.3.13).

$$q = \alpha_1 \cdot (t_f - t_w) \quad (3.3.13)$$

kde	q	$[W / m^2]$	- měrný tepelný tok
	α_1	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	- součinitel přenosu tepla vnitřní tekutiny
	t_f	$[^\circ C]$	- střední teplota proudu uvnitř trubky
	t_w	$[^\circ C]$	- teplota stěny trubky

Hodnota α_1 i q jsou závislé na velikosti t_w . Z předchozích výpočtů jsou známy hodnoty všech 4 teplot. Hodnota t_w se vypočítá pomocí iteračního postupu, který je uveden na obrázku 3.3.2. Na začátku jsou nastřeleny počáteční hodnoty t_w a t_{w1} .



Obr. 3.3.2 Vývojový diagram výpočtu teploty stěny vnitřní trubky

3.3.10 Určení středního logaritmického teplotního spádu, přenášený výkon výměníkem

Problematika výpočtu $\Delta \bar{T}_{\ln}$ byla probrána v kapitole 1.4. Tento rozdíl bude jiný pro souproudé a protiproudé uspořádání. Výpočet se provede dle rovnice (3.3.14). V tuto chvíli jsou známy hodnoty potřebné pro výpočet skutečně přeneseného tepelného výkonu výměníkem tepla. Tento tepelný výkon se označí jako \dot{Q}_x a spočítá se dle rovnice (3.3.15).

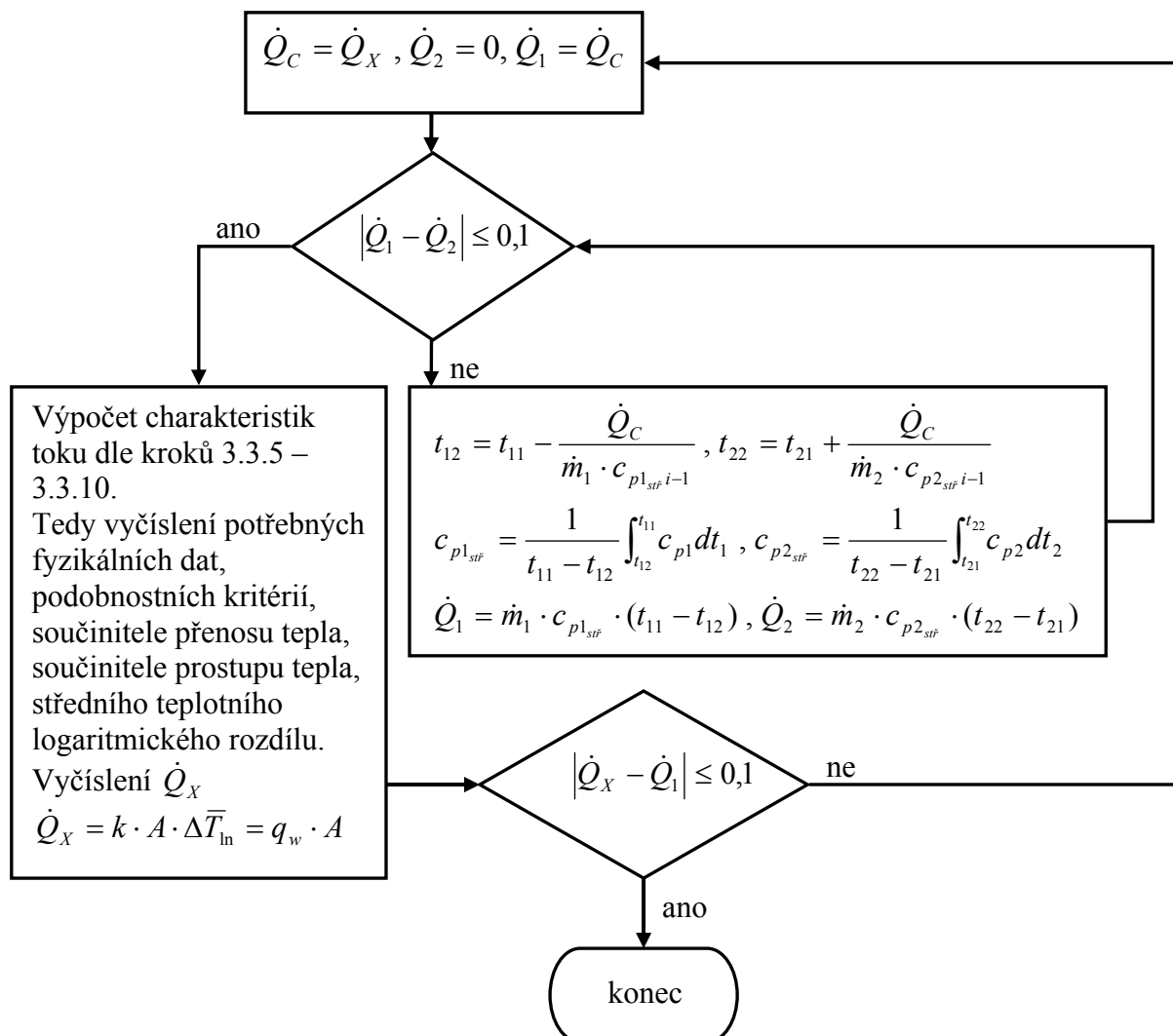
$$\Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (3.3.14)$$

$$\dot{Q}_X = k \cdot A \cdot \Delta \bar{T}_{\ln} = q_w \cdot A \quad (3.3.15)$$

3.3.11 Hodnocení výsledků

Pomocí iteračního cyklu byl v bodě 3.3.10 vypočítán tepelný výkon, jaký by výměník přenesl pro výstupní teploty určené v bodech 3.3.3 a 3.3.4. Výstupní hodnota prvního proudu byla určena přibližným nástřelem. V důsledku tohoto budou hodnoty přenášeného výkonu v krocích 3.3.3 a 3.3.10 po prvním výpočtu rozdílné. To je v rozporu se zákonem zachování energie. Náprava se provede zpřesněním výstupní hodnoty proudu 1 v bodě 3.3.3. Poté se opět provedou všechny po sobě jdoucí výpočty až do určení nového \dot{Q}_X .

Jedná se o iterační postup podobný tomu uvedenému v bodě 3.3.4. S tím rozdílem, že místo \dot{Q}_1 a \dot{Q}_2 budou porovnávány hodnoty \dot{Q}_1 a \dot{Q}_X . V cyklu se bude hodnota výstupního proudu 1, tedy i všech na něm závislých hodnot měnit do té doby, než se tepelné výkony \dot{Q}_1 a \dot{Q}_X budou rovnat. V takovém případě bylo nalezeno skutečné řešení. Popis tohoto výpočtu je uveden na obrázku 3.3.3.



Obr. 3.3.2 Vývojový diagram kontrolního tepelného výpočtu výměníku tepla

Na konec je nutné zkontrolovat výsledky. Zejména hodnotu tlakových ztrát. Ta musí být menší, než dovolené hodnoty, které byly určeny v zadání. Pro správnost řešení je nutné i po vyčíslení skutečných hodnot překontrolovat hodnoty Reynoldsových čísel. Ty ovlivňují použité vzorce u přestupů tepla a nesprávným použitím by došlo ke zkreslení výsledků.

3.4 Detailní popis návrhového výpočtu výměníku tepla

V tomto typu úlohy jsou zadány vstupní teploty obou proudů a jejich hmotnostní toky. Jde o návrh geometrie výměníku tepla, tak aby splnil zadaná kritéria. Nejzákladnějším kritériem bývá potřebná výstupní teplota jednoho z proudů. Zde je to teplota na výstupu chladnější látky. Dalším požadavkem bývají maximální dovolené tlakové ztráty tekutin obou proudů. Existují opět různé metody výpočtů. Dále bude pro návrhový výpočet uvažována pouze metoda využívající střední logaritmický teplotní spád. Je využíváno iteračních postupů pro odhad teploty výstupu druhého média a teploty stěny trubky a numerických metod v případě výpočtu potřebné délky trubky výměníku tepla.

3.4.1 Zadané údaje

V tomto výpočtu je cílem určení geometrie výměníku tepla, tedy plochy výměny tepla. Ta je dána průměrem a délkou trubky. V tomto případě jsou průměry trubky zadány. Cílem tedy bude určit jejich potřebnou délku.

$$\dot{m}_1, \dot{m}_2, t_{11}, t_{21}, \lambda, d_{1i}, d_{2i}, t_{s1}, R_{f1}, R_{f2}, l, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \Delta p_1, \Delta p_2$$

<i>kde</i>	\dot{m}_1, \dot{m}_2 [kg / s]	- hmotnostní toky média 1 a média 2
	t_{11}, t_{21} [°C]	- teploty média 1 a média 2 v místě vstupu
	λ $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	- tepelná vodivost materiálu stěny trubky
	d_{1i}, d_{2i} [m]	- vnitřní průměry vnitřní a vnější trubky
	t_{s1} [m]	- tloušťka stěny trubky 1
	R_{f1}, R_{f2} $\left[\frac{^\circ C \cdot m^2}{W} \right]$	- součinitele zanášení
	l [m]	- délka trubek
	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ [m]	- absolutní drsnost vnitřní a vnější trubky
	$\Delta p_1, \Delta p_2$ [Pa]	- dovolené tlakové ztráty toků 1 a 2

3.4.2 Výpočty dalších charakteristik

Z požadavku výstupní teploty proudu 2 se vypočítá potřebný výkon výměníku tepla dle rovnice (3.4.1)

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 \cdot c_{p_{stř.2}} \cdot (t_{22} - t_{21}) \quad (3.4.1)$$

Následuje výpočet výstupní teploty proudu 1 tak, aby jeho tepelný tok odpovídal výkonu výměníku z předchozího bodu. Princip výpočtu bude ekvivalentní s výpočtem v kapitole 3.3.3. Výstupem tedy bude hodnota teploty t_{12} .

Další výpočty jsou shodné s postupem uvedeným v případě kontrolního výpočtu. Jedná se o vyčíslení termofyzikálních vlastností pro střední teploty proudu.

3.4.3 Vyčíslení bezrozměrných podobnostních kritérií

Zde nastává změna oproti kontrolnímu výpočtu. *Reynoldsovo* a *Prandtlovo* číslo může být v tuto chvíli spočítáno, jsou známy všechny potřebné hodnoty. Problém nastává v určení *Nusseltova čísla*. Ve vzorcích, které se pro jeho výpočet používají v případě laminárního toku látky, se objevuje délka trubek. Ta je v tuto chvíli neznámá.

Výpočet velikosti *Nusseltova čísla* se může provést iteračně. V tomto případě by se dosadila za délku malá hodnota a spočítalo by se *Nusseltovo* číslo, z něj pak ostatní charakteristiky až po součinitel prostupu tepla. Poté by následovalo vyčíslení ΔT_{in} a výpočet přeneseného tepelného toku výměníkem tepla. Tento cyklus by se opakoval a v každém dalším cyklu by se délka trubky zvětšila o zadaný krok. Znovu by se přepočítali pro tuto novou hodnotu všechny charakteristiky. Výpočet by skončil ve chvíli, kdy výkon přenesený výměníkem tepla by se rovnal s určitou přesností výkonu požadovanému.

Možný je i analytický přístup. Při něm se vyhodnotí vzorec pro potřebnou délku trubky výměníku, jak to bylo provedeno v této práci. Vychází se z předpokladu, že požadovaná hodnota výkonu výměníku tepla je známa.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta \bar{T}_{\text{in}} \quad (3.4.2)$$

Zbývají tedy dvě neznámé A a k . Obě tyto neznámé v rovnici (3.4.2) jsou závislé na hodnotě délky trubky L . Navíc v těchto vzorcích vystupuje teplota stěny trubky, která se musí spočítat iteračně. Ostatní hodnoty jako *Nusseltovo* číslo, součinitel α a součinitel přestupu k , jsou na těchto dvou neznámých závislé.

Pomocí programu *Maple* pak byla délka L vyhodnocena z rozepsané podoby rovnice pro tepelný výkon. Bez použití programového přístupu by bylo řešení časově náročné. Ve stejném kroku se tedy provede výpočet délky L i stěny trubky t_w . Přesný postup výpočtu bude probrán v popisu programového řešení tohoto typu výpočtu.

V reálných případech mohou být definovány ještě jiné omezující podmínky. Velmi častý je požadavek maximálních tlakových ztrát. V tomto případě by se provedli doplňující výpočty, viz kapitola 2.7. Jestliže by vyhovovali zadání, byl by výpočet ukončen. V opačném případě by nastal rozbor možných náprav. Mezi tyto patří změna průtoku obou tekutin. Také změny konstrukční, jako změna průměru trubek. Také úpravy pro zvýšení efektivnosti přenosu tepla, např. vnější žebrování trubek.

4 Popis softwarových řešení

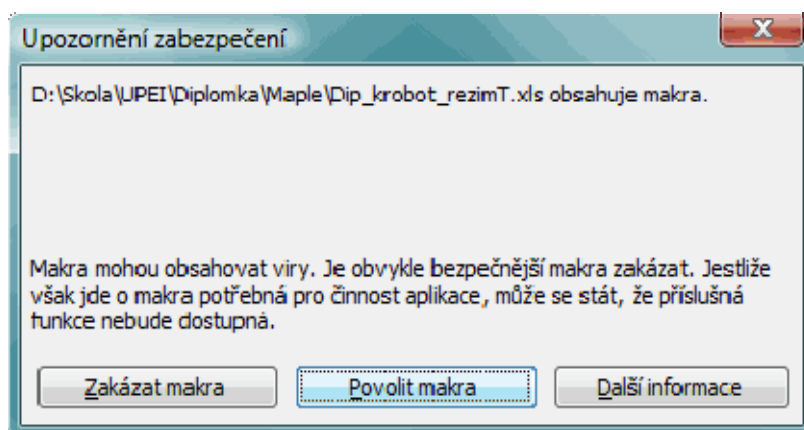
V této práci byl pro softwarové řešení úloh použit program *Maple* a programování jazyk *VBA* v programu *Excel*. V následujících kapitolách bude vysvětlen princip práce s jednotlivými programy, jejich ovládání a princip činnosti. Zdrojové kódy těchto programů jsou uvedeny dále v přílohách.

4.1 Pomocný program VBA

V programovacím prostředí *VBA* byl vytvořen program *Dip_krobot_rezimT.xls*. Tento slouží jako pomoc a rychlá orientace ve výpočtu proudění ve vnitřní trubce. Již v počáteční fázi lze vypočítat jaký typ proudění nastane při daných podmínkách. Program obsahuje i výpočet tlakových ztrát a možnost uložení výsledků do textového souboru.

4.1.1 Popis a ovládání programu v prostředí VBA

Po otevření souboru *Dip_krobot_rezimT.xls*. se ve většině případů objeví tabulka podobná té z obrázku 4.1.1. Na této je potřeba potvrdit volbu „Povolit makra“.



Obr. 4.1.1 Úvodní dialog programu *Excel*

Poté se objeví okno programu, viz. obr. 4.1.2. Okno programu je logicky děleno na dvě části. První slouží pro zadání vstupních dat, druhá pro vypsaní výsledků. Tlačítko *Reset* slouží k opětovnému nastavení výchozích vstupních údajů. *Konec* program ukončí.

Po vyplnění vstupních dat je možné provést výpočet a to stiskem tlačítka *Výpočet*. Dojde k vyplnění do té doby prázdných polí v sekci *Výsledky*. Tyto je pak možné uložit do textového souboru vepsáním požadovaného jména souboru do políčka vedle tlačítka *Ulož* a stiskem tlačítka *Ulož*. Soubor bude uložen do stejného adresáře, ve kterém se nachází soubor s programem.

Obr. 4.1.2 Program na výpočet charakteristik toku v prostředí VBA

Výpočet jako takový využívá stejných vzorců a postupů které budou vysvětleny dále na příkladech v programu *Maple*. Nebudou zde tedy rozebírány. Zdrojový kód tohoto programu je uveden dále v přílohách.

4.2 Pomocné programy Maple

Do této kategorie patří programy, které byli vytvořeny pro pomoc při sledování vlivu různých činitelů na Reynoldsovo číslo. Základní vliv Reynoldsova čísla na celkový charakter toku byl probrán v kapitole 3.1. Programy slouží k pomoci hlavně v počátečních fázích výpočtů, zejména generované grafy.

Jedná se o tři programy, které sledují tyto vlivy na velikost Reynoldsova čísla:

- Vliv změny hmotnostního toku a hydraulického průměru trubek
Dip_krobot_f_prut_prum.mws
- Vliv změny teploty média a hydraulického průměru
Dip_krobot_f_prut_tepl.mws
- Vliv změny hmotnostního toku a teploty
Dip_krobot_f_tepl_prum.mws

Programy jsou svou strukturou podobné, jejich kompletní výpis je v příloze. Pro demonstraci vlastností bude dále popsán program sledující vliv změny hmotnostního toku a hydraulického průměru trubek na výkon výměníku tepla.

4.3 Program sledující změny Reynoldsova čísla

4.3.1 Fyzikální vlastnosti tekutin

Na začátku programu jsou uvedeny fyzikální vlastnosti pro různé tekutiny. Známé tabulkové hodnoty hustoty vody v závislosti na teplotě, jsou načteny do funkce `fro1`. Tato funkce těmito hodnotami proloží kubický splajn. Tím je umožněno vyčíslit hodnotu hustoty dané tekutiny pro libovolnou teplotu. V přílohách jsou uvedeny tabulkové hodnoty pro další látky. Mohou být tedy dle požadavků doplněny do těchto funkčních hodnot dle použité tekutiny ve výpočtech.

```
> restart;
```

Fyzikální vlastnosti vody

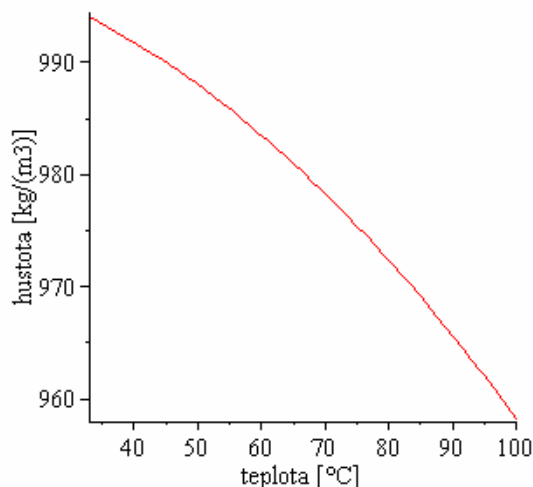
Hustota

```
> fro1:=T-  
> spline([33.0,44.2,55.3,66.5,77.7,88.8,100.0],[994.02,990.30,985.68,  
980.18,973.78,966.49,958.30],T,cubic):
```

Závislost je vykreslena do grafu.

Graf závislosti hustoty na teplotě

```
> plot(fro1(T),T=33..100,labels=["teplota [°C]","hustota  
[kg/(m3)]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

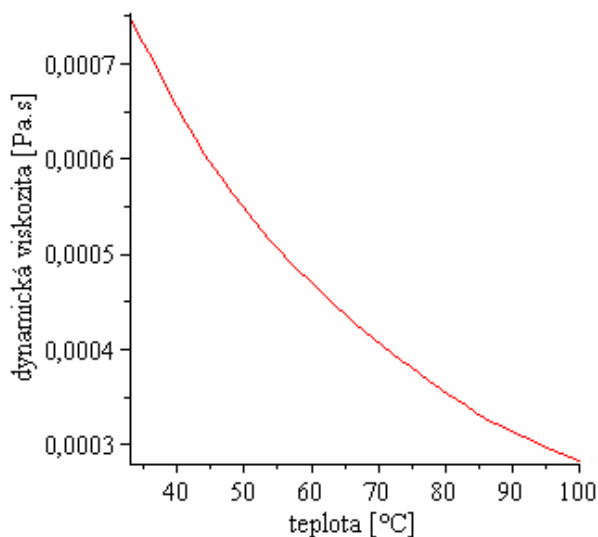


To samé je provedeno s dynamickou viskozitou. V ostatních programech mohou být takto na začátku načteny ještě další vlastnosti. V této práci byly použity tyto:

- Hustota
- Dynamická viskozita
- Měrná tepelná kapacita
- Tepelná vodivost

Dynamická viskozita

```
> fdy1:=T-
> spline([33.0,44.2,55.3,66.5,77.7,88.8,100.0],[0.000748,0.000605,0.000504,0.000428,0.000367,0.000318,0.000284],T,cubic):
> plot(fdy1(T),T=33..100,labels=["teplota [°C]","dynamická viskozita [Pa.s]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```



Jsou použity i jiná média uvnitř trubek. Fyzikální vlastnosti jsou zde vyjádřeny pro všechny použité. Jedná se o tyto další tekutiny a jejich vlastnosti:

- Fyzikální vlastnosti oleje
- Fyzikální vlastnosti kerosenu
- Fyzikální vlastnosti benzínu
- Fyzikální vlastnosti vzduchu

4.3.2 Vstupní data, výpočet Reynoldsových čísel

Nastavení střední teploty proudu se provede změnou čísla za proměnou t_{str} . Poté je do proměnné ρ načtena hodnota hustoty pro tuto teplotu a do η příslušná dynamická viskozita.

Změna tekutiny, pro kterou mají být vypočítány závislosti se provede přepsáním čísla v názvu funkci f_{ro1} a f_{dy1} . Kde jednotlivá čísla znamenají toto:

- f_{ro1} , f_{dy1} – Fyzikální vlastnosti pro vodu
- f_{ro2} , f_{dy2} – Fyzikální vlastnosti pro olej
- f_{ro3} , f_{dy3} – Fyzikální vlastnosti pro kerosen
- f_{ro4} , f_{dy4} – Fyzikální vlastnosti pro benzín
- f_{ro5} , f_{dy5} – Fyzikální vlastnosti pro vzduch

```
> t_str:=80;                # Nastavení střední teploty proudu
rho:=frol(t_str);
eta:=fdyl(t_str);
```

Následuje nastavení počtu grafů, které mají být vykresleny. Zde je nastavena hodnota 5.

```
for i from 0 to 5 do
```

V dalším příkaze se nastaví hodnoty hmotnostních průtoků, pro které budou vykresleny grafy. Nastaví se počáteční hodnota a velikost kroku, který se bude k této počáteční hodnotě přičítat.

```
m:=0.1+0.4*i;
```

V nastavení dalšího cyklu `for` se číslem za slovem `to` určí kolik hodnot bude použito pro vytvoření závislosti velikosti Reynoldsovo čísla a tedy i k vykreslení grafu. Více hodnot znamená větší přesnost, avšak na úkor rychlosti výpočtu. Pod tímto se provede nastavení průměrů trubek, viz. nastavení hmotnostních toků výše.

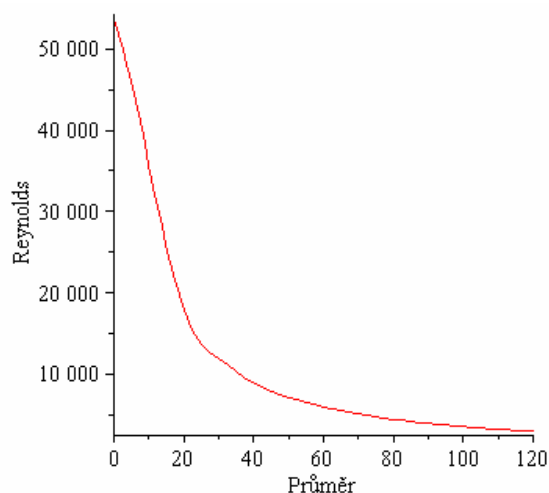
```
for j from 0 to 12 do
  dh:=(10+10*j)/1000;
  A[j]:=dh*1000;
  u:=evalf(4*m/(rho*Pi*dh^2));
  Rey:=dh*u*rho/eta;
  B[j]:=Rey;
end do;

Apole:=[seq(A[j],j=0..12)];
Bpole:=[seq(B[j],j=0..12)];
fce:=A->spline(Apole,Bpole,A,cubic);
plot(fce(A),A=0..120,labels=["Průměr
[mm]", "Reynolds"],labeldirections=[horizontal,vertical]);

end do;
```

Příkaz `plot`, který je uveden výše, provede vlastní vykreslení grafů. V závorkách za ním lze měnit rozsah hodnot průměrů, pro které se bude graf vykreslovat. Jde o rozsah 0..120, a taktéž popis jednotlivých os grafu. Tímto jsou vykresleny žádané grafy.

```
t_str := 80
ρ := 972.348477
η := 0.000355756723
m := 0.1
Apole := [10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130]
Bpole := [35789.61295 17894.80647 11929.87099 8947.40323 7157.92259 5964.93549 5112.80184 4473.70161 3976.62366 3578.96129 3253.60117 2982.46774 2753.04714]
fce := A → spline(Apole, Bpole, A, cubic)
```

Jak bylo uvedeno dříve, další dva programy pro vyjádření ostatních závislostí jsou podobného typu. Jejich popis zde tedy již nebude uváděn.

4.4 Programy kontrolního výpočtu

V této práci jsou dva programy pro kontrolní výpočet výměníku tepla. Rozdíl mezi nimi je v charakteru toku tekutiny proudící v mezitrubkovém prostoru. Jedná se o tyto programy:

- Kontrolní výpočet výměníku tepla s turbulentním tokem tekutiny v mezitrubkovém prostoru
Dip_krobot_k_turb.mws
- Kontrolní výpočet výměníku tepla s laminárním tokem tekutiny v mezitrubkovém prostoru
Dip_krobot_k_lam.mws

Dále bude popsána struktura souboru uvažujícího turbulentní tok v mezitrubkovém prostoru. Druhý program se liší od tohoto nepatrně. Jedná se o odlišný přístup v řešení součinitele přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru a rovnic pro tlakové ztráty. Nebude zde tedy probíráno. Jeho zdrojový kód je uveden v přílohách. Postupy a rovnice kopírují algoritmus řešení kontrolního výpočtu, který byl detailně rozebírán v kapitole 3.3.

4.4.1 Zadání vstupních dat

Na začátku programu se zadávají vstupní údaje. Dále je uveden jejich výčet a význam. Přímě v programu *Maple* jsou k těmto hodnotám vytvořeny komentáře s významem proměnné i její jednotkou pro lepší uživatelskou přehlednost. Desetinná místa je nutno oddělovat tečkou. Ještě před nimi je uveden příkaz `restart`, ten je důležitý pro správný běh programu.

```
> restart;

m1:=0.1:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1
m2:=1.6:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2
t11:=100.:         #[°C] Teplota na vstupu látky 1
t21:=22.:          #[°C] Teplota na vstupu látky 2
```

```

lambda:=45:           #[W/(m.K)] Tepelná vodivost materiálu trubek
dli:=0.04:            #[m] Vnitřní průměr trubky 1
ts1:=0.0025:         #[m] Tloušťka stěny trubky 1
d2i:=0.1:            #[m] Vnitřní průměr trubky 2
l:= 12.:             #[m] Délka trubek
epsilon1:=0.002:     #[m] Drsnost povrchu vnitřní trubky
epsilon2:=0.002:     #[m] Drsnost povrchu vnější trubky
Rz1:=0:              #[m] Součinitel zanášení látky 1
Rz2:=0:              #[m] Součinitel zanášení látky 2
d_dp1:=10000:        #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 1
d_dp2:=10000:        #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 2
  
```

4.4.2 Fyzikální vlastnosti obou medií

Toto bylo již popsáno v kapitole 4.3.1. Médium 1 je zde *olej*. Kapalina proudící v mezitrubkovém prostoru, tedy médium 2 je *Kerosen*. Vyčísleny jsou tyto jejich charakteristiky:

- Hustota
- Dynamická viskozita
- Měrná tepelná kapacita
- Tepelná vodivost

4.4.3 Výpočet společných charakteristik obou proudů

U kontrolního výpočtu je známa geometrie výměníku tepla, jsou tedy na začátku provedeny výpočty plochy výměny tepla a dalších charakteristik. Ty jsou společné pro souproudý i protiproudý tok.

Plocha výměny tepla, hydraulické průměry

Vypočítá se průměr d_{1o} , tedy vnější průměr vnitřní trubky. Plocha výměny tepla A_{1o} je vypočítána jako povrch válce o průměru právě vypočítaného d_{1o} . Nakonec se vypočítají hydraulické průměry dh_1 a dh_2 .

```

> d1o:=dli+2*ts1;
A1o:=evalf(d1o*Pi*l);
dh1:=dli;
dh2:=(d2i-d1o);
  
```

$$d_{1o} := 0.0450$$

$$A_{1o} := 1.696460033$$

$$dh_1 := 0.04$$

$$dh_2 := 0.0550$$

4.4.4 Souproud

Nástřel výstupní teploty média 1

Výstupní teplota je zvolena jako střední teplota rozdílu obou vstupních hodnot. V tomto kroku se jedná o hodnotu předběžnou.

```
> t12:=(t11+t21)/2;
```

$t12 := 61$

Střední logaritmická tepelná kapacita

K výpočtu se použije integrální tvar rovnice, která byla řešena v kapitole 2.1 Horní řádek ze dvou zde uvedených zápisů má uzavřenu pravou stranu rovnice do uvozovek. To značí, že výraz na pravé straně nebude vyčíslen. Dojde k vypsání jeho matematické podoby.

```
cp1_st:='int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12)';
```

```
cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
```

$$cp1_st := \frac{1}{t11 - t12} \int_{t12}^{t11} fcp1(t) dt$$

$cp1_st := 1847.774428$

Výpočet potřebného tepelného výkonu výměníku a výstupní teploty média 2

Potřebný výkon výměníku tepla se nyní spočítá ze známé hodnoty vstupní a výstupní teploty média 1 a výše vypočítané střední měrné tepelné kapacity. Tato hodnota se používá pouze pro výpočet tepelného výkonu.

```
> Q1:='m1*cp1_st*(t11-t12)';Q1:=Q1;
```

$Q1 := m1 \, cp1_st \, (t11 - t12)$

$Q1 := 7206.320269$

Výpočet výstupní teploty proudu 2 se provede iteračně. Nejprve se nastřelí počáteční podmínky pro spuštění iterace.

```
> t22:=(t11+t21)/2;
```

```
Q2:=1e12; it:=0;
```

$t22 := 61$

$Q2 := 0.1 \, 10^{13}$

Samotná iterace je pak provedena cyklem `while`. Ten opakuje celou sekvenci příkazů až po zápis `end do`. V deklaraci cyklu `while` je uvedena podmínka pro ukončení cyklu tak, že absolutní hodnota rozdílu tepelných výkonů teplého a studeného proudu nesmí být vyšší než 0,05.

```
> while abs(Q1-Q2)>0.05 do
```

```
    it:=it+1;
```

```
    cp2_st:=int(fcp2(t),t=t21..t22)/(t22-t21);
```

```
    Q2:=m2*cp2_st*(t22-t21);
```

```
t22:=t21+Q1/(m2*cp2_st);
rozdilQ:=abs(Q1-Q2);
end do;
```

Po provedení potřebného množství kroků se výpočet zastaví a my můžeme provést tisk výsledků. Tedy počet iterací, které se provedli. Dále hodnotu výstupní teploty druhého proudu a rozdíl tepelných výkonů obou proudů.

```
> it:=it; cp2_st:=cp2_st; t22:=t22; rozdílQ:=rozdilQ;
      it := 4
      cp2_st := 1928.038451
      Q2 := 7206.318943
      t22 := 24.33602715
      rozdílQ := 0.001326
```

Určení středního teplotního logaritmického rozdílu.

Jeho výpočet byl probírán v kapitole 1.4. Pro rozhodnutí o tom, který teplotní rozdíl je maximální je použita podmínková konstrukce `if`. Kde `d_T1` a `d_T2` značí zmíněné teplotní rozdíly na opačných koncích výměníku.

```
> d_T1:=t11-t21;
      d_T1 := 78
> d_T2:=t12-t22;
      d_T2 := 36.66397285
> if (d_T1 > d_T2)
    then d_Tmax:=d_T1; d_Tmin:=d_T2;
    else d_Tmax:=d_T2; d_Tmin:=d_T1;
end if;
      d_Tmax := 78
      d_Tmin := 36.66397285
> dT_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
      dT_ln := 54.75592596
```

Stanovení termofyzikálních vlastností tekutiny

Určí se střední teplota proudu a pro ni se pak vyjádří všechny termofyzikální vlastnosti. Jejich hodnoty jsou načteny do příslušných proměnných. Tyto hodnoty se vypočítají pro proud ve vnitřní trubce (proud 1) i mezitrubkovém prostoru (proud 2).

```
> t1_st:=(t12+t11)/2; #střední teploty
      t1_st := 161/2
> t2_st:=(t21+t22)/2;
```

```

t2_st := 23.16801358

> rho1:=fro1(t1_st); #hustoty
      ρ1 :=  $\frac{3017086241}{2867200}$ 

> rho2:=fro2(t2_st);
      ρ2 := 807.9401410

> eta1:=fdy1(t1_st); #dynamické viskozity
      η1 := 0.008876502996

> eta2:=fdy2(t2_st);
      η2 := 0.001990269347

> lambda1:=ftv1(t1_st); #tepelné vodivosti
      λ1 := 0.1330773458

> lambda2:=ftv2(t2_st);
      λ2 := 0.1503162189

> cp1:=fcp1(t1_st); #měrné tepelné kapacity
      cp1 := 1846.422493

> cp2:=fcp2(t2_st);
      cp2 := 1928.038452
    
```

Procesní charakteristiky

Výpočet Prandtlova čísla pro tok 1 a 2. Uvozovky u prvního zápisu způsobí, že výraz v nich uzavřený se nevyčíslí, ale vypíše se jeho matematická prezentace.

```

> Pr1:='eta1*cp1/lambda1'; Pr1:=eta1*cp1/lambda1;
      Pr1 :=  $\frac{\eta_1 cp1}{\lambda_1}$ 
      Pr1 := 123.1597662

> Pr2:='eta2*cp2/lambda2'; Pr2:=eta2*cp2/lambda2;
      Pr2 :=  $\frac{\eta_2 cp2}{\lambda_2}$ 
      Pr2 := 25.52828869
    
```

Reynoldsova čísla pro tok 1 a 2 a výpočet rychlostí toků u1 a u2.

```

> u1:=evalf(4*m1/(rho1*Pi*d1i^2));
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1;
      u1 := 0.07562413140
      Rey1 := 358.5982974

> u2:=evalf(4*m2/(rho2*Pi*(d2i^2-d1o^2)));
Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;
    
```

$$u2 := 0.3161696830$$

$$Rey2 := 7059.114798$$

V dalším kroku je určena teplota stěny vnitřní trubky t_w . Tuto hodnotu je potřeba znát pro vyčíslení vlivu změny dynamické viskozity na součinitel přenosu tepla, viz. kapitola 2.3.2

```
> tw:=(t1_st+t2_st)/2;
```

$$tw := 51.83400679$$

Určení dynamické viskozity pro střední teplotu vnitřní trubky η_{tw} i střední teplotu proudu η_{taf} . Opět budou tyto hodnoty použity k výpočtu Nusseltova čísla vnitřního toku $Nus1$ a mezitrubkového prostoru $Nus2$.

```
> etaw:=fdy1(tw);
```

```
etaf:=fdy1(t1_st);
```

```
Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/l))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
```

$$\eta_{tw} := 0.01894289177$$

$$\eta_{taf} := 0.008876502996$$

$$Nus1 := 8.832350056$$

```
> Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4; # Mezitrubkový prostor
```

$$Nus2 := 100.8176831$$

Součinitelé přestupu tepla a součinitel prostupu tepla

Vypočítají se součinitelé přestupu tepla $\alpha_1(\alpha_1)$ a $\alpha_2(\alpha_2)$ a z nich potom součinitel prostupu tepla k . Použité vzorce musí odpovídat reálným podmínkám.

```
> alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
```

```
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
```

$$\alpha_1 := 29.38464258$$

$$\alpha_2 := 275.5369622$$

```
>
```

```
k:='(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+Rz2)))';
```

$$k := \frac{1}{\frac{dlo \left(\frac{1}{\alpha_1} + Rz1 \right)}{dli} + \frac{1}{2} \frac{dlo \ln \left(\frac{dlo}{dli} \right)}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + Rz2}$$

```
>
```

```
k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+Rz2))) ;
```

$$k := 23.82457098$$

Celkový výkon výměníku tepla

Je vypočítán z rovnice využívající střední logaritmický teplotní rozdíl. Toto číslo je v prvním cyklu rozdílné oproti tepelným výkonům obou proudů, které byly počítány na začátku. Je potřeba dospět ke stejným hodnotám. Postup, jak tohoto dosáhnout bude popsán dále.

```
> Qc:=k*Alo*dT_ln;
```

$Q_c := 2213.093940$

4.4.5 Hlavní výpočtový blok souproudu

V tuto chvíli známe všechny potřebné předběžné hodnoty tak, abychom mohli spustit iterační proceduru, která vypočítá skutečné výstupní teploty obou proudů a skutečný výkon výměníku tepla.

Tento iterační výpočet je realizován cyklem `while`. Jako podmínka pro skončení je udána maximální odchylka vypočítaného výkonu výměníku tepla a tepelných výkonů chladného a horkého proudu. V tomto případě je nastaveno, že její absolutní hodnota musí být po skončení iterace menší, jak 0,1. Změnou podmínky, tedy výrazu „>0.1“ se změní citlivost výsledku. Při vyšších hodnotách bude výpočet rychlejší, ale za cenu snížení přesnosti.

V tomto iteračním cyklu jsou obsaženy všechny výše použité vztahy. Navíc jsou na konci rovnice pro výpočet tlakových ztrát. Uvnitř tohoto cyklu se nachází blok příkazů pro výpočet teploty stěny trubky.

```
> while abs(Qx-Qc)>0.1 do
    it:=it+1;
k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+Rz2)));
    if ( (t11-t21) > (t12-t22) )
        then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;
        else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;
    end if;
dT_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
Qc:=k*Alo*dT_ln;
Q1:=Qc;
    while abs(Q1-Q2)>0.1 do
        t12:=t11-Qc/(m1*cp1_st);
        t22:=t21+Qc/(m2*cp2_st);
        cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
        cp2_st:=int(fcp2(t),t=t21..t22)/(t22-t21);
        Q1:=m1*cp1_st*(t11-t12);
        Q2:=m2*cp2_st*(t22-t21);
        t1_st:=(t11+t12)/2;
        t2_st:=(t21+t22)/2;
        rozdilQ:=abs(Q1-Q2);
```

```

        end do;
t12:=t12; t22:=t22; Q2:=Q2; rozdilQ:=rozdilQ;
rho1:=fro1(t1_st); rho2:=fro2(t2_st);
eta1:=fdy1(t1_st); eta2:=fdy2(t2_st);
cp1:=fcp1(t1_st); cp2:=fcp2(t2_st);
lambda1:=ftv1(t1_st); lambda2:=ftv2(t2_st);
u1:=evalf(4*m1/(rho1*Pi*dli^2));
u2:=evalf(4*m2/(rho2*Pi*(d2i^2-dlo^2)));
Pr1:=eta1*cp1/lambda1; Pr2:=eta2*cp2/lambda2;
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1; Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;
etaf:=fdy1(t1_st);
Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4;
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;

if ( (t11-t21) > (t12-t22) )
    then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;
    else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;
end if;
dT_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
    
```

Výpočet teploty stěny trubky

Hodnota teploty stěny trubky se objevuje ve vzorci pro výpočet součinitele přestupu tepla. Problematika tohoto výpočtu byla uvedena v kapitole 3.3.9. Přesnost výpočtu teploty stěny zde byla stanovena na hodnotu 0,05.

```

tw:=5;
tw1:=(t1_st+t2_st)/2;
while abs(tw-tw1)>0.05 do
    tw:=tw1;
    etaw:=fdy1(tw);
    Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/l))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
    alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
    k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)
        +(1/alpha2+Rz2)));
    q_w:=k*dT_ln;
    tw1:=t1_st-(q_w/alpha1);
    rozdil_tw:=tw-tw1;
end do;
Qx:=q_w*Alo;
    
```



```

lamb1:=(1/(-2*log((6.81/Rey1)^0.9+epsilon1/dh1/3.7)))^2;
lamb2:=(1/(-2*log((6.81/Rey2)^0.9+epsilon2/dh2/3.7)))^2;
d_p1:=lamb1*(1/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(1/dh2)*(u2^2*rho2/2);
end do:

it:=it; k:=k; dT_ln:=dT_ln; Qc:=Qc; Q1:=Q1; t12:=t12;
t22:=t22; Q2:=Q2; rozdilQ:=rozdilQ; rho1:=rho1;
rho2:=rho2; eta1:=eta1; eta2:=eta2; cp1:=cp1;
cp2:=cp2; lambda1:=lambda1; lambda2:=lambda2; u1:=u1;
u2:=u2; Pr1:=Pr1; Pr2:=Pr2; Rey1:=Rey1; Rey2:=Rey2;
tw:=tw; rozdil_tw:=rozdil_tw; etaw:=etaw; etaf:=etaf;
Nus1:=Nus1; Nus2:=Nus2; alpha1:=alpha1; alpha2:=alpha2;
Qx:=Qx; lamb1:=lamb1; lamb2:=lamb2; d_p1:=d_p1; d_p2:=d_p2;

```

it := 5

<i>k := 21.88564941</i>	<i>Qc := 2615.877115</i>	<i>Q1 := 2615.882833</i>
<i>t12 := 86.26462305</i>	<i>t22 := 22.84921645</i>	<i>Q2 := 2615.876774</i>
<i>rozdilQ := 0.006059</i>	<i>ρ1 := 1044.655561</i>	<i>ρ2 := 808.4889621</i>
<i>η1 := 0.006859989785</i>	<i>η2 := 0.002020662608</i>	<i>cp1 := 1904.357028</i>
<i>cp2 := 1925.213511</i>	<i>λ1 := 0.1316711011</i>	<i>λ2 := 0.1504965347</i>
<i>u1 := 0.07617579850</i>	<i>u2 := 0.3159550595</i>	<i>Pr1 := 99.21592248</i>
<i>Pr2 := 25.84914637</i>	<i>Rey1 := 464.0092713</i>	<i>Rey2 := 6952.936989</i>
<i>dT_ln := 70.45629602</i>	<i>tw := 35.59536506</i>	<i>rozdil_tw := 0.00609883</i>
<i>etaw := 0.02893750957</i>	<i>etaf := 0.006859989785</i>	<i>Nus1 := 8.140590861</i>
<i>Nus2 := 100.1015848</i>	<i>α1 := 26.79701405</i>	<i>α2 := 273.9080296</i>
<i>Qx := 2615.910483</i>	<i>lamb1 := 0.1379282785</i>	<i>lamb2 := 0.01267694074</i>
<i>d_p1 := 125.4156478</i>	<i>d_p2 := 111.6163316</i>	

Po ukončení iteračního cyklu dojde k automatickému vypsání výsledků, jak je vidět výše. Nakonec je potřeba zkontrolovat, zda jsou režimy toku skutečně takové, jaký byl předpoklad na začátku a zda tlakové ztráty nejsou větší, než dovolené. K tomu složí na konci rozhodovací konstrukce využívající logickou podmínku *if*. *Maple* dle tohoto předpisu automaticky vypíše, zda mohou být výsledky považovány za platné.

```

> if (Rey1 < 2100)
    then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je
splněn.");
    else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není
splněn!!!");

```

```

end if;
if (Rey2 > 2100)
    then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
    prostoru je splněn.");
    else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
    prostoru není splněn!!!");
end if;
if (d_p1 < d_dp1)
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní
    trubce je splněn.");
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní
    trubce není splněn!!!");
end if;
if (d_p2 < d_dp2)
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového
    prostoru je splněn.");
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového
    prostoru není splněn!!!");
end if;

```

Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.

Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.

4.4.6 Protiproud

Vstupní data

Ty jsou pro protiproud načteny z oblasti vstupních dat souproutého uspořádání. Na začátku výpočtů pro protiproud je pro kontrolu a názornost provedeno jejich vypsání. Jediné, co se v této fázi změní jsou teploty t_{21} a t_{22} . Tyto hodnoty se prohodí. To z toho důvodu, že v případě protiproudu bude vstupní teplota proudu 2 na opačném konci výměníku tepla, než v případě souproutu.

```

>
m1:=m1;m2:=m2;t11:=t11;t22:=t21;lambda:=lambda;dli:=dli;ts1:=ts1;d2i
:=d2i;l:=l;Rz1:=Rz1;Rz2:=Rz2;epsilon1:=epsilon1;epsilon2:=epsilon2;d
_dp1:=d_dp1;d_dp2:=d_dp2;
m1 := 0.1      m2 := 1.6      t11 := 100      t22 := 22      λ := 45      dli := 0.04
ts1 := 0.0025  d2i := 0.1      l := 12      Rz1 := 0      Rz2 := 0      ε1 := 0.002
ε2 := 0.002    d_dp1 := 10000  d_dp2 := 10000

```

Na začátku je opět proveden předběžný nástřel výstupní teploty prvního proudu. Výpočet tepelného výkonu z jeho velikosti a iterační dopočet druhé výstupní teploty.

```

> t12:=(t11+t22)/2;

```

```

cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
Q1:=m1*cp1_st*(t11-t12);
t21:=t22+0.1;
Q2:=0;
it:=0;
while abs(Q1-Q2)>0.05 do
    it:=it+1;
    cp2_st:=int(fcp2(t),t=t22..t21)/(t21-t22);
    Q2:=m2*cp2_st*(t21-t22);
    t21:=t22+Q1/(m2*cp2_st);
    rozdilQ:=abs(Q1-Q2);
end do;

```

it := 3

cp2_st := 1928.038429

Q2 := 7206.283537

t21 := 24.33602718

rozdilQ := 0.036732

Tímto jsou určeny některé proměnné potřebné pro spuštění iterace hlavního výpočtového bloku. Ještě před jeho spuštěním jsou určeny zbývající.

```

> Qx:=0;
Q:=Q2;
it:=0;

```

Qx := 0

Q := 7206.283537

it := 0

4.4.7 Hlavní výpočtový blok protiproudu

Svou strukturou je velice podobný tomu u souproudeho toku. Opět je řešen iteračně. Hodnotu přesnosti lze taktéž volit změnou hodnoty v podmínce u cyklů `while`.

```

> while abs(Qx-Q)>0.1 do
    it:=it+1;
    t12:=t12;
    t21:=t21;
    Qx:=Q;
    Q1:=Q;
    while abs(Q1-Q2)>0.1 do
        cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);

```

```

    cp2_st:=int(fcp2(t),t=t22..t21)/(t21-t22);
    t12:=t11-Qx/(m1*cp1_st);
    t21:=t22+Qx/(m2*cp2_st);
    Q1:=m1*cp1_st*(t11-t12);
    Q2:=m2*cp2_st*(t21-t22);
    rozdilQ:=abs(Q1-Q2);
end do;
Q1:=Q1; Q2:=Q2; t12:=t12; t21:=t21;
if ( (t11-t21) > (t12-t22) )
    then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;
    else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;
end if;
d_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
t1_st:=(t11+t12)/2;          t2_st:=(t21+t22)/2;
rho1:=fro1(t1_st);          rho2:=fro2(t2_st);
eta1:=fdy1(t1_st);          eta2:=fdy2(t2_st);
cp1:=fcp1(t1_st);           cp2:=fcp2(t2_st);
lambda1:=ftv1(t1_st);       lambda2:=ftv2(t2_st);
u1:=evalf(4*m1/(rho1*Pi*d1i^2));
u2:=evalf(4*m2/(rho2*Pi*(d2i^2-d1o^2)));
Pr1:=eta1*cp1/lambda1;      Pr2:=eta2*cp2/lambda2;
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1;     Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;
etaf:=fdy1(t1_st);
Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4;
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
tw:=5;
tw1:=(t1_st+t2_st)/2;

while abs(tw-tw1)>0.05 do
    tw:=tw1;
    etaw:=fdy1(tw);
    Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/l))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
    alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
    k:=(1/(d1o/d1i*(1/alpha1+Rz1)+ d1o/(2*lambda)*ln(d1o/d1i)
        +(1/alpha2+Rz2)));
    q_w:=k*dT_ln;
    tw1:=t1_st-(q_w/alpha1);
    rozdil_tw:=tw-tw1;

```

```

end do:
Q:=q_w*A1o;
lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=(1/(-2*log((6.81/Rey2)^0.9+epsilon2/dh2/3.7)))^2;
d_p1:=lamb1*(1/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(1/dh2)*(u2^2*rho2/2);end do:
printf("                Vypočítané hodnoty ");
printf("                -----");
it:=it;  Q1:=Q1;  Q2:=Q2;  t12:=t12;  t21:=t21;
rho1:=rho1;                rho2:=rho2;
Pr1:=Pr1;                  Pr2:=Pr2;
Rey1:=Rey1;                Rey2:=Rey2;
Nus1:=Nus1;                Nus2:=Nus2;
dT_ln:=dT_ln;              tw:=tw;
rozdil_tw:=rozdil_tw;
eta1:=eta1;                eta2:=eta2;
alpha1:=alpha1;            alpha2:=alpha2;
k:=k;  Q:=Q;  lamb1:=lamb1;  lamb2:=lamb2;
d_p1:=d_p1;  d_p2:=d_p2;

```

Nakonec jsou opět vypsaný výsledky, ověřena platnost použitých vzorců a kontrola dovolených tlakových ztrát.

Vypočítané hodnoty

```

-----
it := 6                Q1 := 2617.427307                Q2 := 2617.427296
t12 := 86.25635357    t21 := 22.84971931                ρ1 := 1044.658216
ρ2 := 808.4887765     Pr1 := 99.22249012                Pr2 := 25.84903776
Rey1 := 463.9723375   Rey2 := 6952.972481                Nus1 := 8.139411509
Nus2 := 100.1018254   dT_ln := 70.50692899                tw := 35.54921997
rozdil_tw := 0.00611301  η1 := 0.006860535864                η2 := 0.002020652295
α1 := 26.79321770     α2 := 273.9085769                k := 21.88280406
Q := 2617.450053       lamb1 := 0.1379392580                lamb2 := 0.01267693638
d_p1 := 125.4253126    d_p2 := 111.6163190

```

Ověření platnosti výpočtu

```

> if (Rey1 < 2100)
    then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je
splněn.");

```

```
    else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není  
splněn!!!");  
end if;  
if (Rey2 > 4000)  
    then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém  
prostoru je splněn.");  
    else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém  
prostoru není splněn!!!");  
end if;  
if (d_p1 < d_dp1)  
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní  
trubce je splněn.");  
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní  
trubce není splněn!!!");  
end if;  
if (d_p2 < d_dp2)  
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového  
prostoru je splněn.");  
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového  
prostoru není splněn!!!");  
end if;  
Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.  
Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.  
Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.  
Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.
```

Tímto kontrolní výpočty v případě platnosti a splnění maximálních dovolených ztrát pro protiproud i sou proud končí.

4.5 Programy návrhového výpočtu

Byli vytvořeny dva programy pro návrhový výpočet výměníku tepla. Jejich rozdíl je v charakteru toku tekutiny v mezitrubkovém prostoru. Jedná se o tyto programy:

- Návrhový výpočet výměníku tepla s turbulentním tokem v mezitrubkovém prostoru chladiče
Dip_krobot_n_turb.mws
- Návrhový výpočet výměníku tepla s laminárním tokem v mezitrubkovém prostoru
Dip_krobot_n_lam.mws

Dále bude popsána struktura programu uvažujícího turbulentní tok v mezitrubkovém prostoru. Druhý program se liší pouze odlišným přístupem k řešení součinitele přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru a rovnicemi pro tlakové ztráty. Jeho zdrojový kód je obsažen v přílohách. Postupy a rovnice kopírují algoritmus řešení návrhového výpočtu, který byl detailně rozebírán v kapitole 3.4. Tento výpočet obsahuje řadu stejných vzorců a postupů,

jako kontrolní výpočet, který byl probírán dříve. Tyto pasáže nebudou tedy znovu detailně popisovány.

4.5.1 Příprava rovnic pro výpočet minimální požadované délky trubky výměníku

V úvodu návrhových programů je řešeno sestavení vzorce, díky kterému lze vypočítat minimální potřebnou délku výměníku tepla. Je to provedeno sloučením vzorců, které délku výměníku obsahují a poté vyjádřením jeho hodnoty na levou stranu rovnice.

První použité rovnice jsou rovnice pro velikost plochy výměny tepla $r0$ a následně výpočet výkonu výměníku tepla s použitím středního logaritmického teplotního spádu $r1$.

```
> restart;
r0:=A=Pi*dlo*L;
r1:=Q=A*dt_ln*k;
```

$$r0 := A = \pi d_{lo} L$$

$$r1 := Q = A dt_{ln} k$$

Základní rovnice, která má být rozepsána je rovnice pro tepelný výkon výměníku $r1$. Plocha A již je rozepsána na základní členy. Zbývá tedy dosadit ještě rozepsanou formu rovnice pro součinitel prostupu tepla $r2$.

```
>
r2:=k=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+Rz2)))/;
```

$$r2 := k = \frac{1}{\frac{d_{lo}}{d_{li}} \left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{z1} \right) + \frac{1}{2} \frac{d_{lo}}{\lambda} \ln \left(\frac{d_{lo}}{d_{li}} \right) + \frac{1}{\alpha_2} + R_{z2}}$$

Z jeho vyjádření jsou na délce trubky výměníku závislé α_1 a α_2 . Pro tyto jsou sepsány rovnice $r3$ a $r4$. První z nich je pro vnitřní tok a druhá pak pro mezitrubkový prostor.

```
>
r3:=alpha1=(lambda1*1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/L))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14)/dh1;
> r4:=alpha2=(lambda2*0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4)/dh2;
```

$$r3 := \alpha_1 = \frac{1.86 \lambda_1 \left(\frac{Rey1 Pr1 dh1}{L} \right)^{(1/3)} \left(\frac{\eta_{af}}{\eta_{aw}} \right)^{0.14}}{dh1}$$

$$r4 := \alpha_2 = \frac{0.023 \lambda_2 Rey2^{0.8} Pr2^{0.4}}{dh2}$$

Poslední neznámá je hodnota η_{aw} , nebo-li dynamická viskozita v těsné blízkosti stěny vnitřní trubky η_w . V tuto chvíli se ale její hodnota nebude vyčíslovat. Nyní jsou již

připraveny všechny potřebné rovnice. V prvním kroku jsou do rovnice součinitele prostupu tepla r_2 dosazeny obě rovnice součinitelů přestupu tepla r_3 a r_4 . Tímto vznikne rovnice r_5 .

$r_5 := \text{subs}(r_4, r_3, r_2);$

$$r_5 := k = 1 / \left(\frac{d_{lo} \left(\frac{0.5376344086 \, dh_1}{\lambda_1 \left(\frac{Rey_1 Pr_1 dh_1}{L} \right)^{(1/3)} \left(\frac{eta_f}{eta_w} \right)^{0.14} + Rz_1} \right)}{d_{li}} + \frac{1}{2} \frac{d_{lo} \ln \left(\frac{d_{lo}}{d_{li}} \right)}{\lambda} \right. \\ \left. + \frac{43.47826087 \, dh_2}{\lambda_2 Rey_2^{0.8} Pr_2^{0.4}} + Rz_2 \right)$$

Jejím dosazením, společně s rovnicí r_0 do základní rovnice tepelného výkonu r_1 vznikne konečný, rozepsaný tvar pro výpočet tepelného výkonu r_6 . Ten bude později využit pro vyčíslení potřebné délky L .

$$r_6 := Q = \pi d_{lo} L dt_{ln} \left(\frac{d_{lo} \left(\frac{0.5376344086 \, dh_1}{\lambda_1 \left(\frac{Rey_1 Pr_1 dh_1}{L} \right)^{(1/3)} \left(\frac{eta_f}{eta_w} \right)^{0.14} + Rz_1} \right)}{d_{li}} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{d_{lo} \ln \left(\frac{d_{lo}}{d_{li}} \right)}{\lambda} + \frac{43.47826087 \, dh_2}{\lambda_2 Rey_2^{0.8} Pr_2^{0.4}} + Rz_2 \right)$$

4.5.2 Zadání vstupních dat

Zadána je většina parametrů, jako u kontrolního výpočtu.

```

m1:=0.2:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1
m2:=0.3:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2
t11:=85.:          #[°C] Teplota na vstupu látky 1
t21:=20.:          #[°C] Teplota na vstupu látky 2
t22:=23.:          #[°C] Požadovaná teplota na výstupu látky 2
lambda:=45.:       #[W/(m.K)] Tepelná vodivost materiálu trubek
dli:=0.015:        #[m] Vnitřní průměr trubky 1
ts1:=0.002:        #[m] Tloušťka stěny trubky 1
d2i:=0.03:         #[m] Vnitřní průměr trubky 2
Rz1:=0:            #[Součinitel zanášení látky 1]
Rz2:=0:            #[Součinitel zanášení látky 2]
d_dp1:=25000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 1
d_dp2:=25000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 2
    
```


4.5.3 Fyzikální vlastnosti tekutin obou proudů

Toto bylo již popsáno výše v kapitole 4.3.1. Médium 1 je zde voda. Kapalina proudící v mezitrubkovém prostoru je olej. Vyčísleny jsou zde tyto jejich charakteristiky:

- Hustota
- Dynamická viskozita
- Měrná tepelná kapacita
- Tepelná vodivost

4.5.4 Výpočet společných charakteristik proudů

Již v úvodu lze vypočítat potřebný tepelný výkon, jsou známy obě požadované teploty u druhé kapaliny. Z nich se vypočítá nejdříve pomocí integrálu střední logaritmická měrná tepelná kapacita.

```
> cp2_st:=int(fcp2(t),t=t21..t22)/(t22-t21);
Q2:=m2*cp2_st*(t22-t21);
Q:=Q2;
```

$$cp2_st := 4166.642557$$

$$Q2 := 3749.978301$$

$$Q := 3749.978301$$

Znáмым způsobem se provede iterační dopočet druhé výstupní teploty t_{12} , tedy teploty média 1. Před tím ještě nutná deklarace potřebných proměnných a nástřel hodnoty t_{12} .

```
> it:=0:
Q1:=0.1:
t12:=(t11+t21)/2:
cp1_st:='int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12)';
cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
```

$$cp1_st := \frac{1}{t_{11} - t_{12}} \int_{t_{12}}^{t_{11}} fcp1(t) dt$$

$$cp1_st := 1796.711338 \dots$$

```
>while abs(Q1-Q2)>0.01 do
    it:=it+1;
    t12:=(t11-Q2/(m1*cp1_st));
    cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
    Q1:=m1*cp1_st*(t11-t12);
    rozdilQ:=abs(Q1-Q2);
end do;
```

```

it := 4
t12 := 74.83146066
cpl_st := 1843.912066
Q1 := 3749.978477
rozdilQ := 0.000176

```

Rozměrová data

Dopočet hydraulických průměrů.

```

> dlo:=dli+ts1;
dh1:=dli;
dh2:=(d2i^2-dlo^2)/(d2i+dlo);
dlo := 0.017
dh1 := 0.015
dh2 := 0.01300000000

```

Stanovení termofyzikálních vlastností obou proudů

Pro střední teploty proudů jsou vyčísleny postupně všechny fyzikální vlastnosti, načtené na začátku programu.

```

> t1_st:=(t12+t11)/2; #střední teploty
t1_st := 79.91573033
> t2_st:=(t21+t22)/2;
t2_st := 21.50000000
> rho1:=fro1(t1_st); #hustoty
ρ1 := 1052.615964
> rho2:=fro2(t2_st);
ρ2 := 997.8511578
> eta1:=fdy1(t1_st); #dynamické viskozity
η1 := 0.008992830309
> eta2:=fdy2(t2_st);
η2 := 0.0008943040493
> lambda1:=ftv1(t1_st); #tepelné vodivosti
λ1 := 0.1331487261
> lambda2:=ftv2(t2_st);
λ2 := 0.6051705846
> cp1:=fcp1(t1_st); #měrné tepelné kapacity
cpl := 1843.819170
> cp2:=fcp2(t2_st);

```

$$cp2 := 4166.654826$$

Procesní charakteristiky, rychlost proudění tekutiny

Provedeno ze známých rovnic. Toto je poslední část společná pro souproudý a protiproudý tok.

Prandtlůva čísla

```
> Pr1:='eta1*cp1/lambda1'; Pr1:=eta1*cp1/lambda1;
```

$$Pr1 := \frac{\eta_1 cp1}{\lambda_1}$$

$$Pr1 := 124.5310669$$

```
> Pr2:='eta2*cp2/lambda2'; Pr2:=eta2*cp2/lambda2;
```

$$Pr2 := \frac{\eta_2 cp2}{\lambda_2}$$

$$Pr2 := 6.157365176$$

Reynoldsova čísla, rychlost proudění látky 1 a 2

```
> u1:=evalf(4*m1/(rho1*Pi*d1i^2));
```

```
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1;
```

$$u1 := 1.075196009$$

$$Rey1 := 1887.784677$$

```
> u2:=evalf(4*m2/(rho2*Pi*(d2i^2-d1o^2)));
```

```
Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;
```

$$u2 := 0.6265047925$$

$$Rey2 := 9087.581488$$

4.5.5 Souproud

První na řadě je výpočet středního logaritmického teplotního rozdílu. Problematika byla detailně probírána v kapitole 1.4.

```
> if ( (t11-t21) > (t12-t22) )
    then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;
    else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;
end if;
dt_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
```

$$d_Tmax := 65.$$

$$d_Tmin := 51.83146066$$

$$dt_ln := 58.16750695$$

Potřebná délka výměníku tepla a dopočet ostatních charakteristik

Na začátku je vyčíslena hodnota dynamické viskozity média 1. Tato hodnota je konečná, protože jsou v tuto chvíli známy všechny výstupní hodnoty. Stejně tak i hodnota Nusseltova čísla proudu 2 a tím i součinitele přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru. Tedy:

```
> etaf:=fdy1(t1_st);
                                     etaf:= 0.008992830309
> Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4;
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
                                     Nus2 := 69.86255348
                                     α2 := 3252.212487
```

Výpočet teploty stěny a potřebné minimální délky trubky výměníku tepla

Výpočet teploty stěny trubky se provede iteračním způsobem. Na začátku jsou stanoveny potřebné data pro zpuštění iteračního cyklu. Jedná se o prvotní nástřely teplot t_w , t_{w1} a vynulování počítadla cyklů it . Teplota t_w je použita pro uchování hodnoty předchozího cyklu. Přesnost výpočtu v cyklu `while` je zde nastavena na 0.05.

```
> tw1:=(t1_st+t2_st)/2;
tw:=5;
it:=0;
while abs(tw-tw1)>0.05 do
    it:=it+1;
    tw:=tw1;
    etaw:=fdy1(tw);
    Q4:=Q1=evalf(rhs(r6));
    L_x:=solve(Q4,L);
    Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/L_x))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
    alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
    k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)
        +(1/alpha2+Rz2)));
    q_w:=k*dt_ln;
    tw1:=t1_st-(q_w/alpha1);
    rozdil_tw:=tw-tw1;
    printf(" ");
    printf(" ");
    printf("-----");
end do;
```

Pro předběžně určenou teplotu t_w je vypočítána hodnota dynamické viskozity. Poté je vyčíslena minimální potřebná délka trubky L_x pomocí rovnic vytvořených v úvodní části tohoto programu. V tuto chvíli může být dopočítáno Nusseltovo číslo proudu 1 a součinitele přestupu a prostupu tepla. Konečným výsledkem je hodnota měrného tepelného toku q_w .

Hodnoty to však nejsou konečné. Je potřeba dospět ke správné teplotě stěny trubky. To se provede jejím opětovným výpočtem z tepelného toku q_w . Tato hodnota stěny trubky a její hodnota z předchozího kroku se musí v rámci dovolené tolerance rovnat. Výpočet skončí až bude tato podmínka splněna. V tomto případě byla nalezena hledaná minimální potřebná délka výměníku tepla. Detaily tohoto výpočtu byly probrány v kapitole 3.3.9.

Na konci iteračního bloku jsou opět vypsány výstupní hodnoty.

```

it := 3
tw := 29.62942714
etaw := 0.03307933104
Q4 := 3749.978477 =  $\frac{3.115894208 \cdot L}{\frac{0.005411914558}{\left(\frac{1}{L}\right)^{(1/3)}} + 0.0003311249110}$ 
L_x := 17.21675865
Nus1 := 9.136443590
α1 := 81.10038833
k := 69.90281736
q_w := 4078.294557
tw1 := 29.62873860
rozdil_tw := 0.00068854
    
```

Tlakové ztráty

Následují výpočty tlakových ztrát ve vnitřní trubce i mezitrubkovém prostoru. Provedeny jsou dle vzorců uvedených v kapitole 2.7.

```

> lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=(1/(-2*log((6.81/Rey2)^0.9+epsilon2/dh2/3.7)))^2;
d_p1:=lamb1*(L_x/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(L_x/dh2)*(u2^2*rho2/2);
lamb1 := 0.03390217156
lamb2 := 0.02529487700
d_p1 := 23765.85460
d_p2 := 6585.302325
    
```

Kontrola použitých vzorců

Nakonec je potřeba zkontrolovat, zda předpoklady o charakteru proudění byli správné. Tedy v tomto případě bylo předpokládáno laminární proudění uvnitř trubky a turbulentní v mezitrubkovém prostoru. A kontrola, zda tlakové ztráty potrubí nepřekračují dovolené hodnoty. Maple v závěru tyto předpoklady potvrdí, nebo vyvrátí.

```

> if (Rey1 < 2100)
    then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je
splněn.");
    else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není
splněn!!!");
end if;
if (Rey2 > 4000)
    then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
prostoru je splněn.");
    else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
prostoru není splněn!!!");
end if;
if (d_p1 < d_dp1)
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní
trubce je splněn.");
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní
trubce není splněn!!!");
end if;
if (d_p2 < d_dp2)
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového
prostoru je splněn.");
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového
prostoru není splněn!!!");
end if;
Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.
Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.
Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.
Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.
    
```

4.5.6 Protiproud

Na začátku tohoto bloku výpočtů se provede přehození teplot t_{21} a t_{22} . Právě z důvodu, že se jedná o protiproudý tok. Toto je jediný rozdíl oproti výpočtům souproutého proudění. Nebudou tedy dále probírány. Zde jsou vypsány výstupní hodnoty protiproudého uspořádání z důvodu porovnání se souproutem.

$d_{Tmax} := 62.$	$d_{Tmin} := 54.83146066$	$dt_{ln} := 58.34234886$
$etaf := 0.008992830309$	$Nus2 := 69.86255348$	$\alpha2 := 3252.212487$
	$it := 3$	
$tw := 29.62942714$	$etaw := 0.03307933104$	

$$Q4 := 3749.978477 = \frac{3.115894208 \cdot L}{\frac{0.005411914558}{\left(\frac{1}{L}\right)^{(1/3)}} + 0.0003311249110}$$

$$L_x := 17.21675865$$

$$Nus1 := 9.136443590$$

$$\alpha1 := 81.10038833$$

$$k := 69.90281736$$

$$q_w := 4078.294557$$

$$tw1 := 29.62873860$$

$$rozdil_tw := 0.00068854$$

$$lamb1 := 0.03390217156$$

$$lamb2 := 0.02529487700$$

$$d_{p1} := 23675.70356$$

$$d_{p2} := 6560.322295$$

Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.

Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.

5 Rozhodnutí o vhodnosti typu toku

V kapitole 3.1 bylo popsáno, jaké jsou faktory ovlivňující charakter toku. To je důležité z hlediska jeho vlivu na výpočty výměníků tepla. Také byli probrány dvě základní úlohy a to výpočet kontrolní a návrhový.

Při rozhodování o vhodnosti toku se tedy provede v první fázi kontrolní, nebo návrhový výpočet dle výše uvedených postupů. Po tomto jsou již známy všechny údaje, podle kterých se později rozhodne o tom, jaký tok zvolit aby byl výsledek optimální. Z hlediska rozmanitosti průmyslových úloh, které využívají výměníky tepla však nelze sepsat jednotný algoritmus pro tento výběr. Různá kritéria a jejich význam budou probrány dále.

5.1 Kritéria rozhodování

V kapitole 1.3 byly probrány některé klady a zápory souproudého i protiproudého uspořádání pracovních látek výměníku tepla. Tato práce se zabývá laminárním prouděním tekutiny v trubkovém prostoru. Tato podmínka vnáší do výpočtů a hodnocení jistá specifika. Tento typ toku ve vnitřní trubce ovlivní základním způsobem výpočet a velikost součinitele přestupu tepla.

Hlavním parametrem výměníku tepla je jeho výkon a rozměry. Výkon, nebo-li maximální přenášený tepelný tok výměníkem se spočítá dle rovnice (5.1.1), ta byla probírána v kapitole 2.4.

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T_{\text{ln}} \quad (5.1.1)$$

Základním požadavkem je dosažení předepsaného tepelného výkonu. Na ten má velmi významný vliv součinitel prostupu tepla k . Jelikož ve vnitřní trubce proudí médium laminárním tokem, bude součinitel přestupu tepla tohoto média značně citlivý na rozdíl mezi teplotou proudu a teplotou stěny trubky. Teplotní ovlivnění stěny trubky je v případě souproudého a protiproudého uspořádání rozdílné. Toto bude mít vliv nejen na součinitel přestupu tepla, ale i na součinitel prostupu tepla, který je na něm závislý. A tedy i na vlastní výkon výměníku tepla. Při dosažení požadovaného tepelného výkonu oběma typy uspořádání musí být rozhodnuto, který bude výhodnější. Důvody a kritéria proč zvolit ten, či onen jsou popsány dále.

5.1.1 Plocha výměny tepla

Větší plocha výměny tepla znamená větší finanční náklady. U *návrhového výpočtu* bude vhodnější z ekonomického hlediska ten výměník, který splní požadavek přenosu tepla s menší plochou A . Není to hledisko jediné, ale významné. Materiály trubek výměníků jsou často z ušlechtilých, popřípadě speciálních kovů. Jejich cena za m^2 je značně vysoká.

U výpočtu *kontrolního* je situace poněkud odlišná. Je dán existující výměník tepla. Cílem je určit, zda bude výměník tepla schopen přenést potřebný výkon za nových podmínek. V případě, že oba typy toků budou tohoto schopny, může být vliv velikosti plochy výměny tepla zanedbán. Důvod je prostý, výměník již existuje a tedy nejsou žádné náklady na pořízení plochy výměny tepla. V tomto případě se bude rozhodovat podle dalších hledisek. Obecné výhody a nevýhody souproudu a protiproudu byli uvedeny v kapitole 1.3.

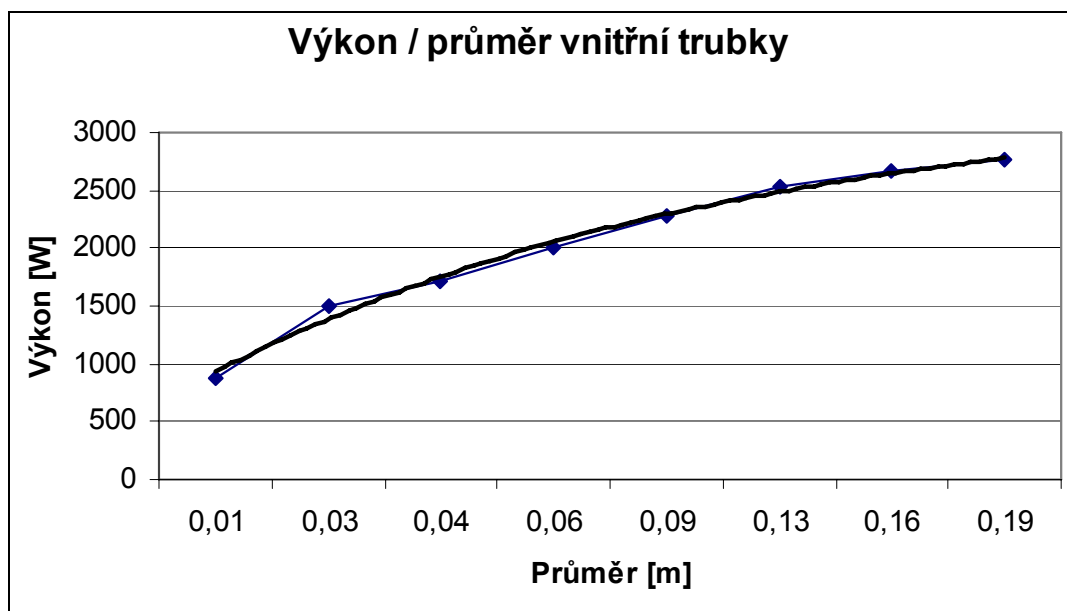
Proud který dosáhne vyššího výkonu na této ploše, může reflektovat na zhoršení provozních podmínek v budoucnu. Popřípadě je schopen ohřát, nebo ochladit větší množství kapaliny, bude více využit. V případě kontrolního výpočtu je tedy kritérium menší plochy výměny tepla z návrhového výpočtu nahrazeno kritériem vyššího výkonu.

V dalších kapitolách budou probrány vlivy ovlivňující velikost plochy výměny tepla.

5.1.2 Vliv průměru trubek na velikost plochy výměny tepla

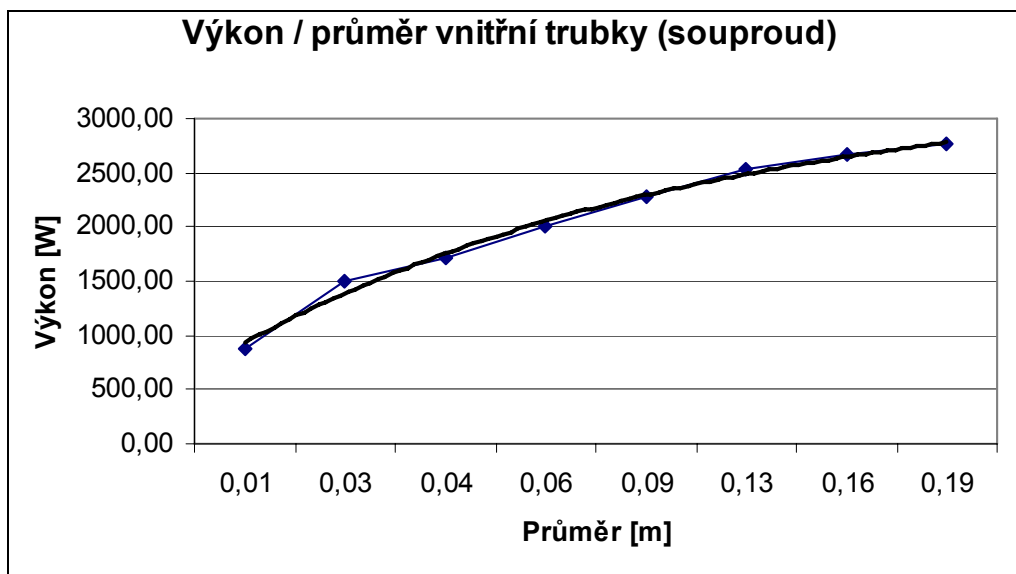
Plocha výměny tepla je závislá na průměru vnitřní trubky, její tloušťce a délce. Tyto rozměry se ale vyskytují i ve vzorcích pro výpočet součinitele přestupu tepla k . Tato závislost tedy nebude lineární.

V případě laminárního toku ve vnitřní trubce a turbulentního režimu v mezitrubkovém prostoru při protiproudém toku, bude tato závislost odpovídat grafu na obrázku 5.1.1.



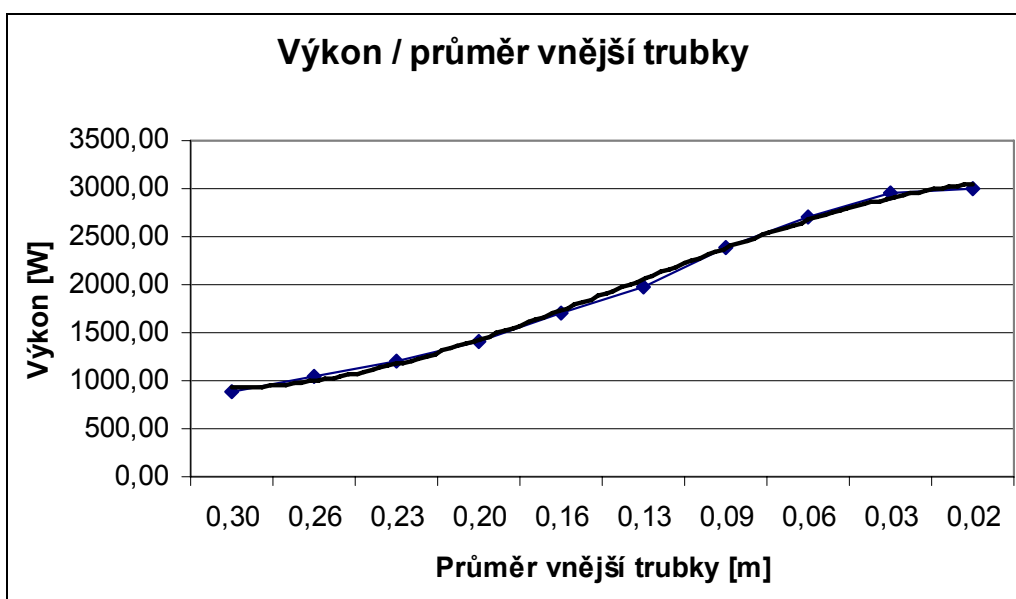
Obr. 5.1.1 Vliv změny průměru vnitřní trubky na výkon výměníku tepla

U souproutého režimu toku je vliv na výkon výměníku v závislosti na změně vnitřního průměru trubky uveden na obrázku 5.1.2. Ostatní charakteristiky jsou stejné, jako v případě protiproudého toku výše.



Obr. 5.1.2 Vliv změny průměru vnitřní trubky u soproudu

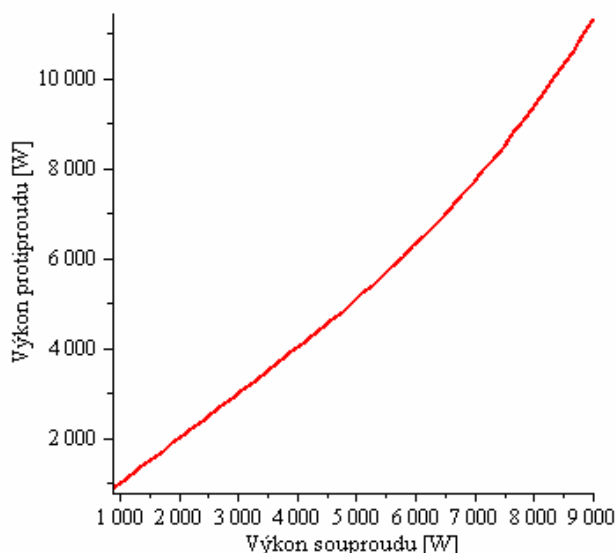
Pro úplnost je na obrázku 5.1.3 uvedena i závislost změny výkonu výměníku na vnějším průměru. V tomto případě se však plocha výměny tepla již nemění, není závislá na vnější trubce. Výkon se však měnit bude a to vlivem změn jiných charakteristik.



Obr. 5.1.3 Vliv změny průměru vnější trubky na výkon výměníku tepla

Soproud vs. Protiproud

Grafy na obrázcích 5.1.1 a 5.1.2 mají velmi podobný tvar. Porovnáním jejich hodnot vznikne graf, který je uveden na obr. 5.1.4. Tento vyjadřuje vzájemný vztah mezi oběma typy uspořádání při stejných provozních podmínkách. Graf je platný v tomto konkrétním případě. Je ilustrativně uveden aby bylo zřejmé, že tato charakteristika nevykazuje lineární průběh.



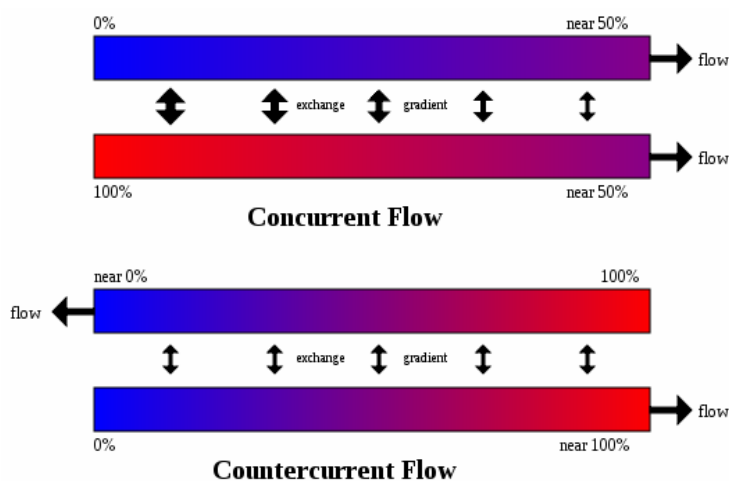
Obr. 5.1.4 Porovnání výkonů souproudu a protiproudu při změně d_{li}

5.1.3 Jiná kritéria

Kritérium velikosti plochy výměny tepla není kritériem jediným. Samozřejmě je pořizovací cena výměníku tepla důležitým faktorem. Mezi další kritéria patří:

- Teplota stěny trubky
- Tlakové ztráty
- Stávající zapojení

Výměníky tepla jsou také někdy používány jako reaktory. To znamená, že v nich probíhá chemická reakce. Pro řadu reakcí je důležitá tepelná stálost. Obecně je v případě souproudu tepelná zátěž na stěně trubky menší, než v případě protiproudého uspořádání. To dokazuje obrázek 5.1.5. Pak může být tento požadavek primární. Uspokojení nároků chemické reakce je prvořadé.



Obr. 5.1.5 Teplotní rozložení na délce výměníku u souproudu a protiproudu

legenda k
obr. 5.1.5

concurrent flow
countercurrent flow

- souproudý tok
- protiproudý tok

Volba jednoho, nebo druhého typu toku není přesně vyhraněná úloha. Je potřeba brát v úvahu účel, ke kterému bude výměník sloužit. Ve většině případů je však rozhodující cena a tedy menší plocha výměny tepla je brána jako ukazatel vhodnosti řešení.

5.2 Řešené příklady

V této podkapitole věnující se problematice výběru vhodného uspořádání budou probrány konkrétní příklady řešení návrhových a kontrolních výpočtů a rozhodnutí o tom, který proud bude výhodnější. Nejpodrobněji bude probrán první příklad.

Postup řešení výběru vhodného uspořádání je vždy stejný.

- Shromáždění vstupních dat
- Vložení vstupních dat do výpočtových programů
- Kontrolní, nebo návrhový výpočet
- Použití rozhodovacích kritérií

5.2.1 Kontrolní výpočet 1

Tato práce se zabývá laminárním charakterem proudění tekutiny ve vnitřní trubce, popřípadě i v mezitrubkovém prostoru. Při kontrolním výpočtu jsou voleny nové provozní podmínky a kontrolováno, zda výměník bude schopen v těchto podmínkách přenést požadovaný tepelný výkon.

Již při volbě těchto podmínek je vytvořen program v jazyce *VBA*, který byl popsán v kapitole 4.1. Jeho účelem je rychlá pomoc při řešení charakteristik toků. Do příloh byly také vloženy pro pomoc tabulkové hodnoty termofyzikálních vlastností tekutin v práci použitých.

Jsou-li tedy stanoveny odpovídající počáteční podmínky provede se jejich vložení do jednoho z programů kontrolního výpočtu. Ty se liší charakterem toku v mezitrubkovém prostoru.

Jako první ukázka bude použit kontrolní výpočet popsáný v programech kontrolního výpočtu, tedy kapitole 4.4. Jako médium 1 byl použit olej, tekutina 2 byl Kerosen. Zadané údaje byly:

```

m1:=0.1:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1
m2:=1.6:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2
t11:=100.:         #[°C] Teplota na vstupu látky 1
t21:=22.:          #[°C] Teplota na vstupu látky 2
lambda:=45:        #[W/(m.K)] Tepelná vodivost materiálu trubek
d1i:=0.04:          #[m] Vnitřní průměr trubky 1
ts1:=0.0025:        #[m] Tloušťka stěny trubky 1
d2i:=0.1:           #[m] Vnitřní průměr trubky 2
l:= 12.:            #[m] Délka trubek
epsilon1:=0.002:    #[m] Drsnost povrchu vnitřní trubky
  
```

```

epsilon2:=0.002:      #[m] Drsnost povrchu vnější trubky
Rz1:=0:               # Součinitel zanášení látky 1
Rz2:=0:               # Součinitel zanášení látky 2
d_dp1:=10000:         #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 1
d_dp2:=10000:         #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 2
    
```

Po provedení výpočtu v programu *Maple*, viz. kapitola 6, je potřeba stanovit, zda mohou být vypočítané výsledky brány jako správné. To se provede kontrolou výpisů v sekcích:

- Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro souproud
- Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro protiproud

Výsledky, viz kapitola 4.4, byli v případě obou uspořádání proudů takovéto:

Souproud

Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.
 Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.
 Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.
 Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.

Protiproud

Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.
 Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.
 Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.
 Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.

Všechny požadavky jsou splněny. Výsledky mohou být považovány za platné. V případě nesplnění požadavků na turbulentní tok v mezitrubkovém prostoru se použije druhý z vytvořených programů kontrolního výpočtu.

Platné výsledky byli uvedeny v kapitole 4.4. Pro rozhodnutí o vhodnosti uspořádání budou porovnávány tyto z nich:

Souproud	Protiproud
$Q_c := 2615.877115$	$Q := 2617.450053$
$t_{l2} := 86.26462305$	$t_{l2} := 86.25635357$
$t_{22} := 22.84921645$	$t_{21} := 22.84971931$
$Re_{y1} := 464.0092713$	$Re_{y1} := 463.9723375$
$Re_{y2} := 6952.936989$	$Re_{y2} := 6952.972481$
$dT_{ln} := 70.45629602$	$dT_{ln} := 70.50692899$
$tw := 35.59536506$	$tw := 35.54921997$
$\alpha_1 := 26.79701405$	$\alpha_1 := 26.79321770$

$$\alpha_2 := 273.9080296$$

$$d_{p1} := 125.4156478$$

$$d_{p2} := 111.6163316$$

$$\alpha_2 := 273.9085769$$

$$d_{p1} := 125.4253126$$

$$d_{p2} := 111.6163190$$

Uvedené výsledky dávají přehled o nejdůležitějších charakteristikách výměníku tepla v závislosti na uspořádání proudů pracovních látek. Dle kritérií uvedených dříve v kapitole 5.1 Je v případě kontrolního výpočtu hlavním hlediskem ve většině případů tepelný výkon. Z výsledků vychází tepelný výkon protiproudého uspořádání o $1,6 \text{ W}$ vyšší. Tato hodnota je v porovnání s celkovým výkonem v tomto případě však značně malá. Činí asi $0,06 \%$.

Z těchto výsledků vycházejí tedy oba typy uspořádání takřka stejné. V těchto případech se přihlíží k dalším kritériím, uvedeným v úvodu této kapitoly. Jedno z nich bylo tepelné ovlivnění stěny trubky a tedy i samotného média proudícího uvnitř ní. Rozdíl mezi výstupními teplotami proudu 2 je $5,028 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$, tedy opět zanedbatelná hodnota. Teplota stěny je pak v případě souproudu o $0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$ vyšší. Hodnota tlakové ztráty je v případě protiproudu o $9,6648 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$ vyšší.

Porovnání souproudu a protiproudu neukázalo jasnou výhodu jednoho, nebo druhého typu uspořádání toků a tedy v případě, že výměník je již ve výrobní lince zapojen ponechá se podle posledního kritéria současné uspořádání pracovních látek.

5.2.2 Kontrolní výpočet 2

Bylo zjištěno, že obě média proudící výměníkem tepla budou mít charakter laminárního toku. Pro zadaná data proveďte posouzení vhodnosti obou uspořádání proudění pracovních látek. Médium 1 je olej, médium 2 Kerosen.

Zadaná data

```
> m1:=0.1:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1
m2:=0.1:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2
t11:=140.:         #[°C] Teplota na vstupu látky 1
t21:=22.:          #[°C] Teplota na vstupu látky 2
lambda:=45.:       #[W/(m.K)] Tepelná vodivost materiálu trubek
d1i:=0.04:         #[m] Vnitřní průměr trubky 1
ts1:=0.0025:       #[m] Tloušťka stěny trubky 1
d2i:=0.12:         #[m] Vnitřní průměr trubky 2
l:= 30.:           #[m] Délka trubek
epsilon1:=0.002:   #[m] Drsnost povrchu vnitřní trubky
epsilon2:=0.002:   #[m] Drsnost povrchu vnější trubky
Rz1:=0:            #[Součinitel zanášení látky 1
Rz2:=0:            #[Součinitel zanášení látky 2
d_dp1:=10000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 1
d_dp2:=10000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 2
```

Kontrola možnosti použití výpočtových vzorců

Souproud

Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.

Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.

Protiproud

Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.

Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.

Vypočítané hodnoty pomocí programu v Maple

Souproud	Protiproud
$Q_c := 3709.762351$	$Q := 3743.916670$
$t_{22} := 40.93153285$	$t_{21} := 41.10234996$
$Re_{y1} := 1197.027274$	$Re_{y1} := 1193.872519$
$Re_{y2} := 463.1016135$	$Re_{y2} := 463.9848233$
$dT_{ln} := 98.54987208$	$dT_{ln} := 99.51222211$
$tw := 90.07233129$	$tw := 89.56787173$
$\alpha_1 := 21.31098812$	$\alpha_1 := 21.28843584$
$\alpha_2 := 16.71715359$	$\alpha_2 := 16.71568299$
$d_{p1} := 125.0176812$	$d_{p1} := 125.3407764$
$d_{p2} := 3.649181918$	$d_{p2} := 3.642523048$

Hodnocení výsledků

Hodnota výkonu v případě protiproudu je o 34,2 W vyšší. Hodnota výstupní teploty proudu 2 je v případě protiproudu o 0,2 °C vyšší, což je hodnota zanedbatelná. Výraznější rozdíly nejsou ani v hodnotách tlakových ztrát, nebo teplotě stěny. Vyšší hodnota výkonu výměníku tepla v případě protiproudého uspořádání činí přibližně 1 % výkonu navíc oproti souproudému uspořádání. Byl by tedy zvolen toto uspořádání toků pracovních látek.

5.2.3 Návrhový výpočet

Při návrhovém výpočtu je požadována výstupní teplota jednoho z proudů, zde je to výstupní teplota proudu 2. Tedy toho proudícího v mezitrubkovém prostoru.

Již při návrhu vstupních dat může být použit příložený program, vytvořený v jazyku *VBA*. Ten byl popsán v kapitole 4.1. Jeho účelem je rychlá pomoc při řešení charakteristik toků. Do příloh byly také vloženy pro pomoc tabulkové hodnoty termofyzikálních vlastností tekutin v práci použitých.

Jsou-li tedy stanoveny odpovídající počáteční podmínky provede se jejich vložení do jednoho z programů návrhového výpočtu. Ty se liší charakterem toku pracovní látky v mezitrubkovém prostoru.

Při návrhu výměníku tepla je předpoklad, že obě média budou proudit laminárním tokem. Jsou zadána následující data:

```
> m1:=0.2:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1
m2:=0.1:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2
t11:=85:           #[°C] Teplota na vstupu látky 1
t21:=20:           #[°C] Teplota na vstupu látky 2
t22:=29:           #[°C] Požadovaná teplota na výstupu látky 2
lambda:=45:        #[W/(m.K)] Tepelná vodivost materiálu trubek
d1i:=0.02:         #[m] Vnitřní průměr trubky 1
ts1:=0.002:        #[m] Tloušťka stěny trubky 1
d2i:=0.05:         #[m] Vnitřní průměr trubky 2
epsilon1:=0.002:   #[m] Drsnost povrchu vnitřní trubky
epsilon2:=0.002:   #[m] Drsnost povrchu vnější trubky
Rz1:=0:            #[Součinitel zanášení látky 1]
Rz2:=0:            #[Součinitel zanášení látky 2]
d_dp1:=25000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 1
d_dp2:=25000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 2
```

Po provedení výpočtu v programu *Maple*, viz. kapitola 6, je potřeba stanovit, zda mohou být vypočítané výsledky brány jako správné. To se provede kontrolou výpisů v sekcích:

- Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro souproud
- Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro protiproud

Vypsané výsledky

Souproud

Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.

Předpoklad laminárního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.

Protiproud

Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.

Předpoklad laminárního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní trubce je splněn.

Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového prostoru je splněn.

Z výpisů vyplývá, že úvodní předpoklady byly správné a výsledky mohou být považovány za platné. V případě nesplnění požadavků na laminární tok v mezitrubkovém prostoru se použije druhý z vytvořených programů návrhového výpočtu.

Výpis platných výsledků důležitých pro rozhodnutí vhodnosti uspořádání toku

Souproud	Protiproud
$L_x := 25.89096512$	$L_x := 25.56594884$
$Nus1 := 8.307604230$	$Nus1 := 8.331591493$
$Nus2 := 7.332852617$	$Nus2 := 7.344383252$
$\alpha1 := 55.30736255$	$\alpha1 := 55.46705625$
$\alpha2 := 159.6399681$	$\alpha2 := 159.8909960$
$k := 38.20257432$	$k := 38.30074841$
$q_w := 2095.730074$	$q_w := 2122.372794$
$tw1 := 42.02298126$	$tw1 := 41.65174219$
$rozdil_tw := 0.01672820$	$rozdil_tw := 0.01757690$
$d_{p1} := 11265.43254$	$d_{p1} := 11124.01452$
$d_{p2} := 57.55494755$	$d_{p2} := 56.83244475$

Uvedené výsledky dávají přehled o nejdůležitějších charakteristikách výměníku tepla v závislosti na uspořádání proudů pracovních látek. Dle kritérií uvedených dříve v kapitole 5.1 je v případě návrhového výpočtu hlavním hlediskem ve většině případů minimální plocha výměny tepla, která bude za potřebí.

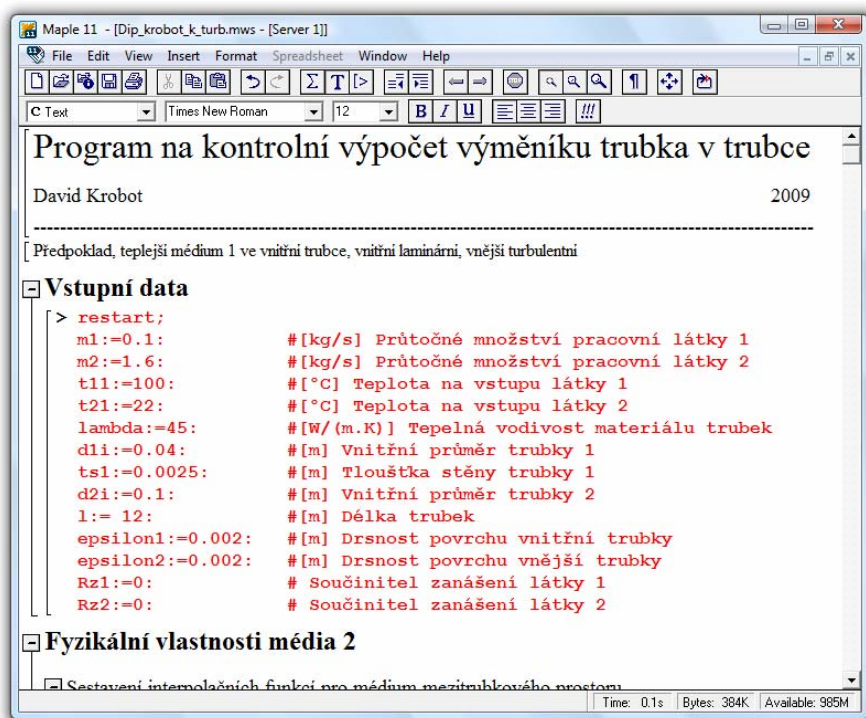
V tomto příkladě je plocha výměny tepla zastoupena potřebnou délkou L_x . Z vypsaných hodnot vyplývá, že potřebná délka v případě souproudého uspořádání je o $0,33\text{ m}$ menší. Také tlaková ztráta vnitřní trubky je v případě protiproudu o 141 Pa menší. Z těchto důvodů je vhodnější volba protiproudého uspořádání toku pracovních látek.

6 Popis pracovního prostředí programu Maple

Program *Maple* využívá technologie pro symbolické výpočty. Program umožňuje nejenom numerické výpočty, ale i mnohem složitější výpočty jako např. stanovení řešení soustav rovnic, numerických hodnot matematických funkcí, nalezení kořenů polynomů, vlastních čísel a vektorů matice. *Maple* je programový systém počítačové algebry vyvinutý během uplynulých dvaceti let společně na několika západních univerzitách, přičemž největší podíl práce vykonala skupina vědců sdružená pod názvem "*Symbolic Computation Group*" na universitě ve Waterloo v Kanadě. Dále pak na federální technické universitě *ETH Zürich* ve Švýcarsku, kam část této skupiny přešla v roce 1990. Jméno *Maple* bylo odvozeno z anglického akronymu Mathematics pleasure (Matematika potěšením). Během posledních deseti let se *Maple* stal jedním z nejmodernějších a nejintenzivněji se rozvíjejících systémů počítačové algebry ve světě.

6.1 Prostředí *classic worksheet*

K výpočtu byl použit program *Maple* verze 11. Programy byly zpracovány v prostředí *classic worksheet*. Jeho pracovní prostředí je ukázáno na obrázku 6.1.1. Programy vyžadují minimum uživatelského zásahu.



Obr. 6.1.1 Pracovní prostředí *Maple* – *classic worksheet*

Červeně zbarvený text označuje zdrojový text *Maple*. **#** uvozuje textové poznámky, které nemají vliv na běh programu. Ukončení příkazu se provádí buď středníkem, nebo dvojtečkou. Dvojtečka pak způsobí, že *Maple* nebude vypisovat výsledky daného příkazu, ovšem provedeny budou.

> restart;

m1:=0.1: #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1

m2:=1.6: #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2

Černě zbarvený text je pak prostý text, používaný k vytváření textové části ve zdrojovém kódu. Poslední použitý *modrý text*, jsou hodnoty vypisované programem Maple. Tedy vlastní výstupní data programu.

$$t_{l2} := 61$$

$$cp1_st := \frac{1}{t_{l1} - t_{l2}} \int_{t_{l2}}^{t_{l1}} fcp1(t) dt$$

$$cp1_st := 1847.774428$$

Programy jsou rozděleny do jednotlivých souborů, dle způsobu použití. Ovládání je vždy podobné. Pouze se provede zápis vstupních dat, která jsou známa a spustí se výpočet.

6.2 Vložení vstupních dat

Vložení stupních dat se provede přepsáním stávajících hodnot proměnných v sekci **Vstupní data** tak, že hodnoty jsou vepsány mezi znaky „:=“ a „:“ u příslušné proměnné.

Význam proměnných je pro lepší orientaci vepsán, jako poznámky přímo ve zdrojovém kódu programu. Hodnoty vstupních dat je třeba zadávat s desetinnou tečkou, místo desetinné čárky.

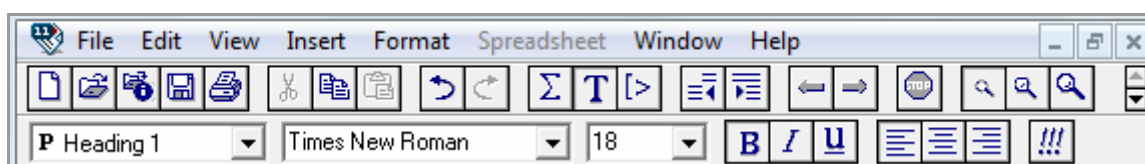
```

Vstupní data
> restart;
m1:=0.1:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1
m2:=1.6:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2
t11:=100:          #[°C] Teplota na vstupu látky 1
t21:=22:           #[°C] Teplota na vstupu látky 2
lambda:=45:        #[W/(m.K)] Tepelná vodivost materiálu trubek
d11:=0.04:         #[m] Vnitřní průměr trubky 1
ts1:=0.0025:       #[m] Tloušťka stěny trubky 1
d21:=0.1:          #[m] Vnitřní průměr trubky 2
l:= 12:            #[m] Délka trubek
epsilon1:=0.002:   #[m] Drsnost povrchu vnitřní trubky
epsilon2:=0.002:   #[m] Drsnost povrchu vnější trubky
Rz1:=0:            #[m] Součinitel zanášení látky 1
Rz2:=0:            #[m] Součinitel zanášení látky 2
d_dp1:=10000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 1
d_dp2:=10000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 2
    
```

Obr. 6.2.1 Prostor pro zadání vstupních dat

6.3 Výpočet pro zadaná vstupní data

Po zadání hodnot do programu stačí stisknout tlačítko s třemi vykřičníky, viz. obrázek 6.3.1. Zde je toto tlačítko umístěno v pravém dolním rohu. Poté je automaticky proveden celý výpočet. Při změně vstupních dat se opět tyto zadají do oblasti k tomu určené a přepočítají se tyto hodnoty se provede opětovným stisknutím tlačítka s třemi vykřičníky.



Obr. 6.3.1 Horní nabídková lišta

7 Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou výběru vhodného uspořádání toku pracovních látek s laminárním režimem proudění v trubkovém chladiči typu trubka v trubce.

V úvodní části práce jsou blíže popsány konstrukční a provozní parametry řešeného výměníku tepla spolu s vlivem zapojení a chování pracovních látek. V další části práce je představena výpočtová problematika vlastního procesu sdílení tepla. Laminární režim toku jedné pracovní látky vnáší do výpočtového řešení výměníku tepla určitá specifika.

Vliv uspořádání toků pracovních látek výměníkem na výsledné vybrané provedení byl vyšetřován pomocí dvou typů výpočtů - výpočtu návrhového a kontrolního. U každého tohoto typu byly navíc vyšetřovány dvě kombinace charakterů toků proudících medií. Ve vnitřní trubce proudilo médium vždy laminárním tokem. Pro mezitrubkový byl vytvořen zvlášť postup, kdy tekutina proudí v laminárním, nebo turbulentním režimu.

Výsledkem je vytvoření postupů a vývojových diagramů pro jednotlivé typy a kombinace proudění. Tak aby bylo možno vyčíslit potřebné charakteristiky, díky nimž lze rozhodnout o vhodnějším uspořádání proudění pracovních látek.

Pro účely výpočtů charakteristik výměníků a proudění bylo vytvořeno sedm výpočtových souborů v programu *Maple* a jeden v integrovaném jazyce *VBA* v programu *Excel*. Bez těchto vytvořených programů by bylo rozhodnutí o vhodnosti uspořádání toků pracovních látek mnohonásobně pomalejší. V některých případech by nebylo možné bez těchto programů ani některé charakteristiky vypočítat.

V závěru práce byl popsán konečný rozhodovací algoritmus podle kterého lze vybrat vhodnější ze dvou uspořádání toků pracovních látek. Tato práce společně s vytvořenými programy a možností použití v mnoha různých kombinacích poskytuje rychlý a kvalitní nástroj pro tepelné a hydraulické výpočty výměníku tepla typu trubka v trubce.

8 Seznam použité literatury

- [1] Stránky firmy ZVU Engineering [online]. Dostupné z <<http://www.zvuengineering.cz/>>
- [2] Stehlík P., Kohoutek J., Němčanský J.: *Tepelné pochody: výpočet výměníku tepla*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1991, 129 s. ISBN
- [3] *Modelace tepelného zatížení výměníku tepla* [online]. Dostupné z <http://www.philonnet.gr/img/consulting/heat_exchanger_large.jpg>
- [4] Návod do cvičení z tepelných pochodů od doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.
- [5] Encyclopedia britannica [online] [cit. 14. února 2009]. Dostupné z <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/258672/heat-exchanger>>
- [6] Basics of Industrial Heat Transfer [online] [cit. 17. února 2009]. Dostupné z <http://www.cheresources.com/heat_transfer_basics.shtml>
- [7] Přenos tepla vedením [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 23. listopadu 2008]. Dostupné z <http://www.kks.zcu.cz/podklady/PROE/MECH1/heat_transfer.html#Anchor>
- [8] Wolverine Engineering Data Book II [on line] [cit. 20. dubna 2009]. Dostupné z <http://www.wlv.com/products/databook/ch1_1.pdf>
- [9] Wolverine Engineering Data Book II [on line] [cit. 20. dubna 2009]. Dostupné z <http://www.wlv.com/products/databook/ch1_2.pdf>
- [10] Jícha M.: *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 2001. 160 s. ISBN 80-214-2029-4
- [11] Nožička J.: *Sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. 238 s. ISBN 80-01-01599-8
- [12] Ochrana L.: *Kotle a výměníky tepla*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 2004. 85 s. ISBN 80-214-2847-3
- [13] Perry, R. H., Green, D. V., Maloney, J. O.: *Perry's Chemical Engineers 'Handbook*, 7th edition, McGraw-Hill, New York (1997)
- [14] Janalík J., Šťáva, P.: *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2002. Dostupné z <<http://www.338.vsb.cz/mechtek.pdf>>

9 Seznam obrázků

Obr. 1.1.1 Výměník tepla s pevnými trubkovnicemi.....	11
Obr. 1.1.2 Výměník se šroubovicovým přepážkovým systémem	12
Obr. 1.1.3 Schéma výměníku s plovoucí hlavou [2]	12
Obr. 1.1.4 Trubkové výměníky s U-trubkami [3].....	13
Obr. 1.2.1 Výměník trubka v trubce-tří modulový [4] Obr. 1.2.2 Modul výměníku [5]	13
Obr. 1.2.3 Rozebíratelné projevení výměníku typu trubka v trubce.....	14
Obr. 1.2.4 Typy konstrukčních úprav vnějšího povrchu trubek a), b) podélné c) příčné	14
Obr. 1.3.1 Souprouté uspořádání výměníku a průběh teplot [5].....	15
Obr. 1.3.2 Teplotní intervaly u souproutu a protiproudu.....	15
Obr. 1.3.3 Protiproudé uspořádání výměníku a průběh teplot.....	16
Obr. 1.4.1 Grafické znázornění ΔT_{ln} u protiproudeho toku	17
Obr. 2.1.1 Tepelný výměník a hmotnostní toky m_A a m_B	18
Obr. 2.1.2 Výpočet $c_{p,sif}$ a jeho grafické znázornění	19
Obr. 2.2.1 Znázornění tepelného toku u výměníku tepla [6].....	19
Obr. 2.3.1 Sdílení tepla vedením [7]	20
Obr. 2.3.2 Přestup tepla rovinnou deskou [8] a jeho lineární průběh [4]	20
Obr. 2.3.3 Vedení tepla trubkou Obr. 2.3.4 Průběh teploty Obr. 2.3.5 Bimetalová trubka	21
Obr. 2.3.7 Teplená (koncentrační) mezní vrstva[10] Obr. 2.3.8 Rychlostní mezní vrstva[10]	23
Obr. 2.3.9 Znázornění typů toku napříč tekutinou [10].....	23
Obr. 2.4.1 Průřez stěnou trubky při prostupu tepla z jedné pracovní látky do druhé	26
Obr. 2.5.1 Ukázka zanášení a změny teplotního profilu v jeho důsledku [4].....	27
Obr. 2.7.1 Nikuradseho diagram $\lambda = (Re, \varepsilon/d_h)$	30
Obr. 2.7.2 Hodnoty absolutních drsností běžně používaných materiálů [4].....	31
Obr. 3.1.1 Znázornění typů toku napříč tekutinou [10].....	32
Obr. 3.1.2 Závislost Re na d_h při $m=0.1$ kg/s Obr. 3.1.3 Závislost Re na d_h při $m=0.5$ kg/s	33
Obr. 3.1.4 Závislost Re na d_h při $m=1.3$ kg/s Obr. 3.1.5 Závislost Re na d_h při $m=2.1$ kg/s	33
Obr. 3.1.6 Závislost Re na d_h , $m=0.1$ kg/s Obr. 3.1.7 Závislost Re na d_h , $m=0.1$ kg/s	33
Obr. 3.1.6 Závislost Re na t , $d_h=35$ mm Obr. 3.1.7 Závislost Re na t , $m=2.1$, $d_h=35$ mm.....	34
Obr. 3.3.1 Vývojový diagram výpočtu chybějící výstupní teploty.....	38
Obr. 3.3.2 Vývojový diagram výpočtu teploty stěny vnitřní trubky.....	40
Obr. 3.3.2 Vývojový diagram kontrolního tepelného výpočtu výměníku tepla	41
Obr. 4.1.1 Úvodní dialog programu Excel.....	44
Obr. 4.1.2 Program na výpočet charakteristik toku v prostředí VBA.....	45
Obr. 5.1.1 Vliv změny průměru vnitřní trubky na výkon výměníku tepla	73
Obr. 5.1.2 Vliv změny průměru vnitřní trubky u souproutu.....	74
Obr. 5.1.3 Vliv změny průměru vnější trubky na výkon výměníku tepla	74
Obr. 5.1.4 Porovnání výkonů souproutu a protiproudu při změně d_{li}	75
Obr. 5.1.5 Teplotní rozložení na délce výměníku u souproutu a protiproudu	75
Obr. 6.1.1 Pracovní prostředí Maple – classic worksheet	82
Obr. 6.2.1 Prostor pro zadání vstupních dat	83
Obr. 6.3.1 Horní nabídková lišta	83
Závislost Re na d_h při $m=0.1$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=0.5$ kg/s
Závislost Re na d_h při $m=1.3$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=2.1$ kg/s
Závislost Re na d_h při $m=0.1$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=0.5$ kg/s
Závislost Re na d_h při $m=1.3$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=2.1$ kg/s
Závislost Re na d_h při $m=0.1$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=0.5$ kg/s
Závislost Re na d_h při $m=0.1$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=0.5$ kg/s
Závislost Re na d_h při $m=1.3$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=2.1$ kg/s
Závislost Re na d_h při $m=0.1$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=0.5$ kg/s
Závislost Re na d_h při $m=1.3$ kg/s	Závislost Re na d_h při $m=2.1$ kg/s

10 Seznam rovnic

$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta \bar{T}_{\ln}$ (1.3.1)	16
$\Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}$ (1.4.1)	17
$\Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)}}$ nebo $\Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}$ (1.4.2)	17
$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_{p_{stř}} \cdot (t_1 - t_2)$ (2.1.1)	18
$\dot{m}_A \cdot c_{p_{střA}} \cdot (t_{A1} - t_{A2}) = \dot{m}_B \cdot c_{p_{střB}} \cdot (t_{B2} - t_{B1})$ (2.1.2)	18
$c_{p_{střA}} = \frac{1}{t_{A1} - t_{A2}} \int_{t_{A2}}^{t_{A1}} c_{pA} dt_A$ $c_{p_{střB}} = \frac{1}{t_{B2} - t_{B1}} \int_{t_{B1}}^{t_{B2}} c_{pB} dt_B$ (2.1.3)	19
$\frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} = \lambda \left(\frac{T_1 - T_2}{X_1 - X_2} \right) = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta X}$ (2.3.1)	20
$\frac{\dot{Q}}{A} = \dot{q} = -\lambda \frac{dt}{dx} = -\lambda \cdot grad(t)$ (2.3.2)	20
$\frac{\dot{Q}}{2\pi r L} = -\lambda \frac{dt}{dx}$ (2.3.3)	21
$\dot{Q} = \frac{2\pi \lambda L (T_i - T_o)}{\ln(r_o / r_i)}$ (2.3.4)	21
$\dot{Q} = \frac{2\pi L \lambda_i (T_i - T')}{\ln(r' / r_i)}$ (2.3.5)	22
$\dot{Q} = \frac{2\pi L \lambda_0 (T_i - T')}{\ln(r_o / r')}$ (2.3.6)	22
$\dot{Q} = \frac{T_i - T_0}{\frac{\ln(r' / r_i)}{2\pi L \lambda_i} + \frac{\ln(r_o / r')}{2\pi L \lambda_0}}$ (2.3.7)	22
$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_w)$ (2.3.8)	22
$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_h}$ (2.3.9)	23
$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$ (2.3.10)	23
$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$ (2.3.11)	24
$Nu = 3,66 + 12 \cdot \left(\frac{d_{2i}}{d_{1o}} \right)^{0,8} + \frac{0,19 \cdot \left[1 + 0,14 \cdot \left(\frac{d_{2i}}{d_{1o}} \right)^{0,5} \right] \cdot \left[Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{h2}}{L} \right]^{0,8}}{1 + 0,117 \cdot \left[Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{h2}}{L} \right]^{0,467}}$ (2.3.12)	24

$Nu = 1,86 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{h1}}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$ (2.3.13)	24
$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$ (2.3.14)	24
$Re = \frac{u \cdot d_h \cdot \rho}{\mu}$ (2.3.15)	24
$d_h = \frac{4 \cdot S}{O}$ (2.3.16)	25
$d_{h1} = d_{li}$ (2.3.17)	25
$d_{h2} = d_{2i} - d_{1o}$ (2.3.18)	25
$\dot{Q} = A_i \cdot \alpha_i \cdot (T_i - T_{iw})$ (2.4.1)	26
$\dot{Q} = A_w \cdot \frac{\lambda_w}{s_w} \cdot (T_{iw} - T_{ow})$ (2.4.2)	26
$\dot{Q} = A_o \cdot \alpha_o \cdot (T_{ow} - T_o)$ (2.4.3)	26
$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T_{ln}$ (2.4.4)	26
$R_f = \frac{\Delta T_f}{\dot{q}}$ (2.5.1)	27
$\dot{Q} \cdot \left(\frac{1}{A_i \cdot \alpha_i} + \frac{1}{A_w \cdot \frac{\lambda_w}{s_w}} + \frac{1}{A_o \cdot \alpha_o} \right) = T_i - T_o$ (2.6.1)	28
$\dot{Q} = A_o \cdot \left(\frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \cdot \alpha_i} + \frac{1}{\frac{A_o}{A_w} \cdot \frac{s_w}{\lambda_w}} + \frac{1}{\alpha_o} \right) \cdot (T_i - T_o)$ (2.6.2)	28
$k = \left(\frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \cdot \alpha_i} + \frac{1}{\frac{A_o}{A_w} \cdot \frac{s_w}{\lambda_w}} + \frac{1}{\alpha_o} \right)$ (2.6.3)	28
$k = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + R_{fi} \right) + \frac{d_o}{2 \cdot \lambda_w} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i} + \left(\frac{1}{\alpha_o} + R_{fo} \right)}$ (2.6.4)	28
$\Delta p_{zC} = \underbrace{(p_1 - p_2)}_1 + \underbrace{\frac{\rho_1 \cdot u_1^2}{2} - \frac{\rho_2 \cdot u_2^2}{2}}_2 + \underbrace{g \cdot (h_1 \cdot \rho_1 - h_2 \cdot \rho_2)}_3$ (2.7.1)	28
$\Delta p_{zC} = \Delta p_t + \Delta p_m$ (2.7.2)	29
$\Delta p_t = \lambda_{zt} \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \rho$ (2.7.3)	29

$\lambda_{zt} = \frac{64}{\text{Re}}$ (2.7.4)	29
$\lambda = f(\text{Re}, k_r)$ (2.7.5)	29
$k_r = \frac{\varepsilon}{d}$ (2.7.6)	29
$\lambda = \frac{0,3164}{4\sqrt{\text{Re}}}$ (2.7.7)	30
$\lambda = \frac{1}{\left(2 \cdot \log \frac{d}{k} + 1,138\right)^2}$ (2.7.8)	30
$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \cdot \log \left[\left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} + \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d_h} \right]} \right)^2$ (2.7.9)	31
$\frac{c_{stř} \cdot d}{\nu} \cong 2300 = \text{Re}_{krit}$ (3.1.1)	32
$\dot{Q}_{\max} = C_{\min} \cdot (T_{h,in} - T_{s,in})$ (3.2.1)	34
$C_{\min} = \min \{C_h, C_c\} = \min \{c_{p_{stř},h} \cdot \dot{m}_h, c_{p_{stř},c} \cdot \dot{m}_c\}$ (3.2.2)	34
$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \dot{Q}_{\max} = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{h,in} - T_{s,in})$ (3.2.3)	35
$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$ (3.2.4)	35
$C_{\max} = \max \{C_h, C_c\} = \max \{c_{p_{stř},h} \cdot \dot{m}_h, c_{p_{stř},c} \cdot \dot{m}_c\}$ (3.2.5)	35
$\dot{m}_1, \dot{m}_2, t_{11}, t_{21}, \lambda, d_{1i}, d_{2i}, t_{s1}, R_{f1}, R_{f2}, l, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \Delta p_1, \Delta p_2$	36
$d_{1o} = d_{1i} + 2 \cdot t_{s1}$ (3.3.1)	37
$A = \frac{\pi \cdot d_{1o}^2}{4} \cdot l$ (3.3.2)	37
$t_{12} = \frac{(t_{11} + t_{21})}{2}$ (3.3.3)	37
$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p_{stř1}} \cdot (t_{11} - t_{12})$ (3.3.4)	37
$c_{p_{stř1}} = \frac{1}{t_{11} - t_{12}} \int_{t_{12}}^{t_{11}} c_{p1} dt_1$ (3.3.5)	37
$\text{Pr}_1 = \frac{\mu_1 \cdot c_{p1}}{\lambda_1} \quad \text{Pr}_2 = \frac{\mu_2 \cdot c_{p2}}{\lambda_2}$ (3.3.6)	38
$\text{Re}_1 = \frac{u_1 \cdot d_{h1} \cdot \rho_1}{\mu_1} \quad \text{Re}_2 = \frac{u_2 \cdot d_{h2} \cdot \rho_2}{\mu_2}$ (3.3.7)	38
$Nu_1 = 1,86 \cdot \left(\text{Re}_1 \cdot \text{Pr}_1 \cdot \frac{d_{h1}}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_{w1}} \right)^{0,14} \quad Nu_2 = 0,023 \cdot \text{Re}_2^{0,8} \cdot \text{Pr}_2^{0,4}$ (3.3.8)	38
$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$ (3.3.9)	39

$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \cdot \log \left[\left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} + \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot dh} \right]} \right)^2$	(3.3.10).....	39
$\alpha_1 = Nu_1 \cdot \frac{\lambda_1}{d_{h1}} \quad \alpha_2 = Nu_2 \cdot \frac{\lambda_2}{d_{h2}}$	(3.3.11).....	39
$k = \left(\frac{1}{\frac{d_{lo}}{d_{li}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{f1} \right) + \frac{d_{lo}}{2 \cdot \lambda_w} \cdot \ln \frac{d_{lo}}{d_{li}} + \left(\frac{1}{\alpha_2} + R_{f2} \right)} \right)$	(3.3.12).....	39
$q = \alpha_1 \cdot (t_f - t_w)$	(3.3.13).....	39
$\Delta \bar{T}_{\ln} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}$	(3.3.14).....	40
$\dot{Q}_X = k \cdot A \cdot \Delta \bar{T}_{\ln} = q_w \cdot A$	(3.3.15).....	41
$\dot{m}_1, \dot{m}_2, t_{11}, t_{21}, \lambda, d_{li}, d_{2i}, t_{s1}, R_{f1}, R_{f2}, l, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \Delta p_1, \Delta p_2$		42
$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 \cdot c_{p_{sif2}} \cdot (t_{22} - t_{21})$	(3.4.1).....	42
$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta \bar{T}_{\ln}$	(3.4.2).....	43
$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T_{\ln}$	(5.1.1).....	72

11 Přílohy

11.1 Obsah příloh

11.2	Fyzikální vlastnosti látek.....	92
11.3	Grafy závislosti Re na dh při různých hmotnostních tocích	93
11.3.1	Grafy vody	93
11.3.2	Grafy oleje.....	94
11.3.3	Grafy Kerosenu	95
11.3.4	Grafy benzínu.....	95
11.3.5	Grafy vzduchu.....	96
11.4	Zdrojový kód programu v jazyce VBA.....	97
11.5	Zdrojové kódy pomocných programů Maple.....	100
11.5.1	Vliv změny průměru trubky a hmotnostního toku.....	100
11.5.2	Vliv změny hmotnostního průtoku a střední teploty toku	102
11.5.3	Vliv změny průměru trubky a střední teploty proudu	103
11.6	Kontrolní výpočty	104
11.6.1	Kontrolní výpočet s turbulentním tokem v MP	104
11.6.2	Kontrolní výpočet s laminárním tokem v MP	115
11.7	Návrhové výpočty	117
11.7.1	Návrhový výpočet s turbulentním tokem v MP	117
11.7.2	Návrhový výpočet s laminárním tokem v MP.....	127

11.2 Fyzikální vlastnosti látek

Voda							
teplota [°C]	33	44.2	55.3	66.5	77.7	88.8	100
hustota [kg/m^3]	994.02	990.30	985.68	980.18	973.78	966.49	958.30
dynamická viskozita [$Pa.s$]	0.000748	0.000605	0.000504	0.000428	0.000367	0.000318	0.000284
měrná tepelná kapacita [$J/kg.K$]	4167.0	4167.3	4170.7	4177.2	4186.7	4199.4	4215.2
tepelná vodivost [$W/m.K$]	0.6229	0.6402	0.6545	0.6660	0.6745	0.6802	0.6829

Olej					
teplota [°C]	50	60	100	140	180
hustota [kg/m^3]	1100.0	1065.0	1040.0	1010.0	1000.0
dynamická viskozita [$Pa.s$]	0.040	0.015	0.006	0.002	0.0008
měrná tepelná kapacita [$J/kg.K$]	1618.0	1760.0	1937.0	2144.0	2385.0
tepelná vodivost [$W/m.K$]	0.144	0.136	0.131	0.128	0.126

Kerosen					
teplota [°C]	0	50	100	150	200
hustota [kg/m^3]	825	788	750	712	676
dynamická viskozita [$Pa.s$]	0.003	0.00108	0.00047	0.0002	0.00012
měrná tepelná kapacita [$J/kg.K$]	1840	2030	2220	2410	2600
tepelná vodivost [$W/m.K$]	0.156	0.144	0.133	0.121	0.109

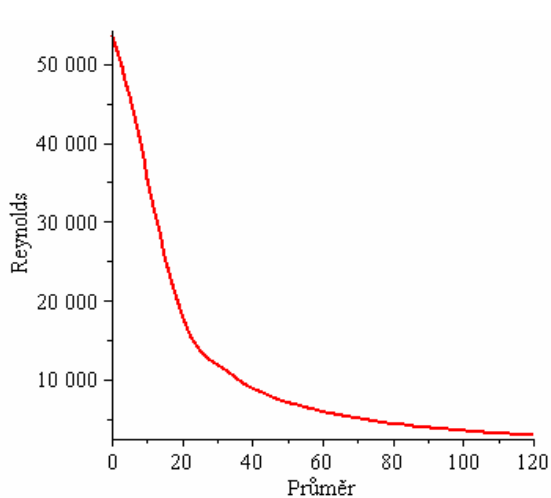
Benzín				
teplota [°C]	50	100	150	200
hustota [kg/m^3]	721	681	628	570
dynamická viskozita [$Pa.s$]	3.67E-4	2.25E-4	1.55E-4	1.11E-4
měrná tepelná kapacita [$J/kg.K$]	2200	2460	2740	3040
tepelná vodivost [$W/m.K$]	0.1105	0.1005	0.0919	0.08

Vzduch									
teplota [°C]	20	60	100	200	300	400	500	600	700
hustota [kg/m ³]	1.1887	1.0456	0.9334	0.7359	0.6076	0.5173	0.4504	0.3988	0.3578
dynamická viskozita [Pa.s]	1.818E-7	2.07E-7	2.221E-7	2.575E-7	2.946E-7	3.279E-7	3.580E-7	3.860E-7	4.114E-7
měrná tepelná kapacita [J/kg.K]	1006	1007	1011	1022	1047	1068	1093	1114	1137
tepelná vodivost [W/m.K]	0.0256	0.0285	0.0314	0.0385	0.0447	0.0502	0.0555	0.0607	0.066

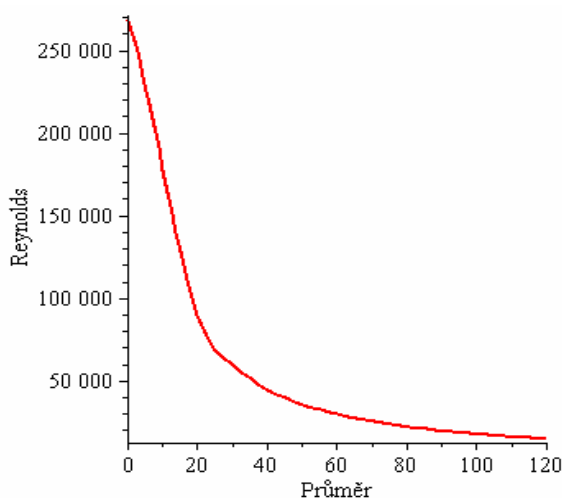
11.3 Grafy závislosti Re na dh při různých hmotnostních tocích

V těchto grafech dh [mm] značí hydraulický průměr a m [kg/s] hmotnostní tok látky při střední teplotě toku 80°C.

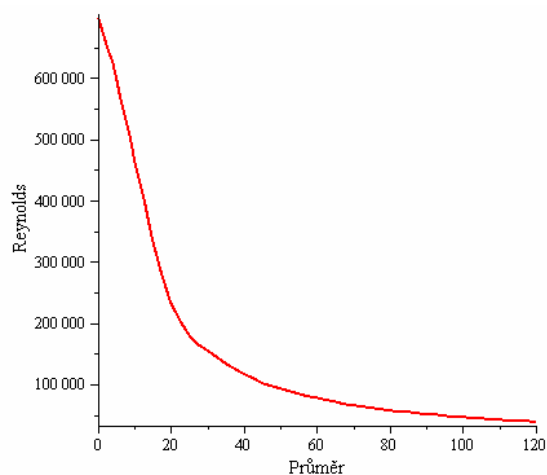
11.3.1 Grafy vody



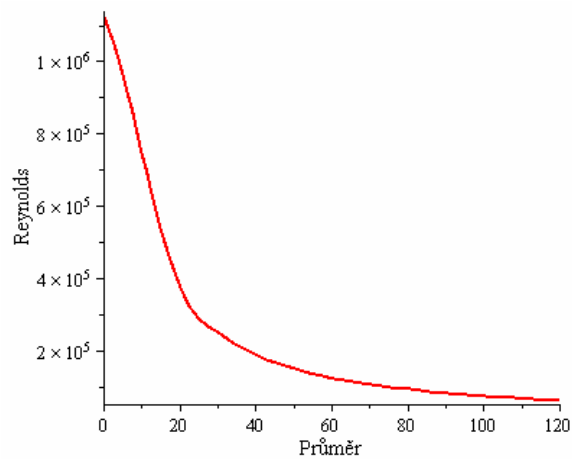
Závislost Re na dh při $m=0.1$ kg/s



Závislost Re na dh při $m=0.5$ kg/s

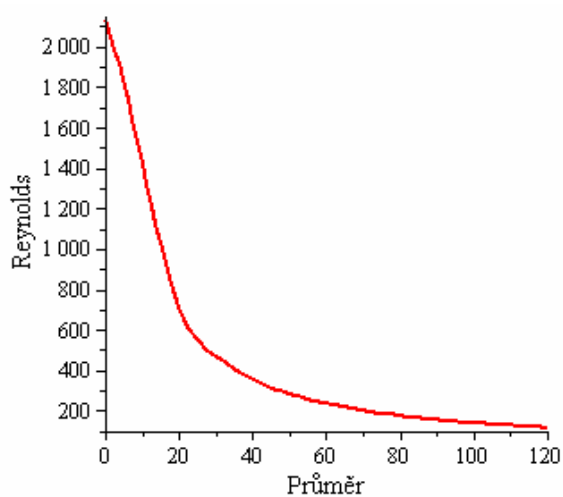


Závislost Re na dh při $m=1.3 \text{ kg/s}$

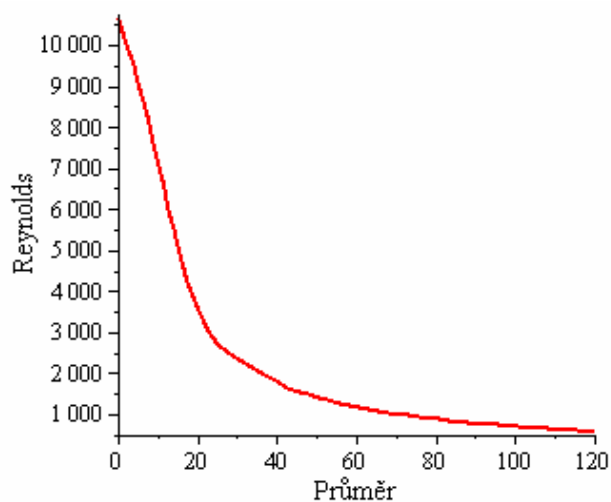


Závislost Re na dh při $m=2.1 \text{ kg/s}$

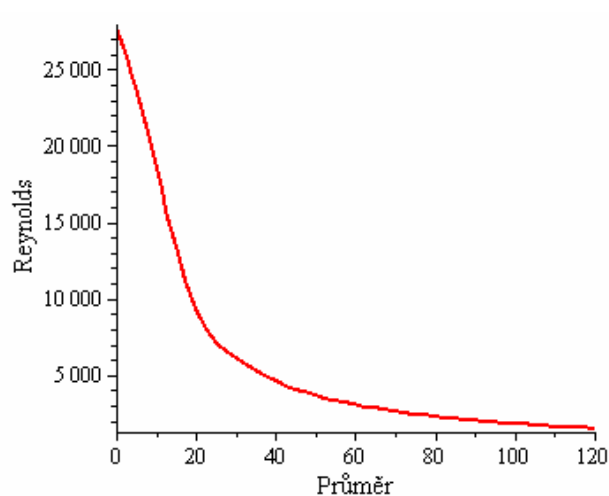
11.3.2 Grafy oleje



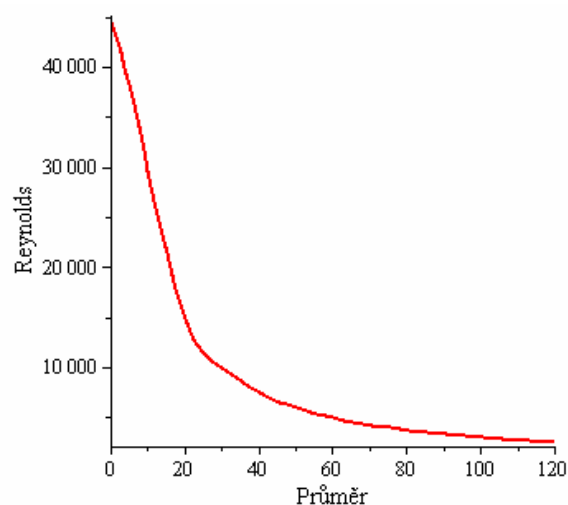
Závislost Re na dh při $m=0.1 \text{ kg/s}$



Závislost Re na dh při $m=0.5 \text{ kg/s}$

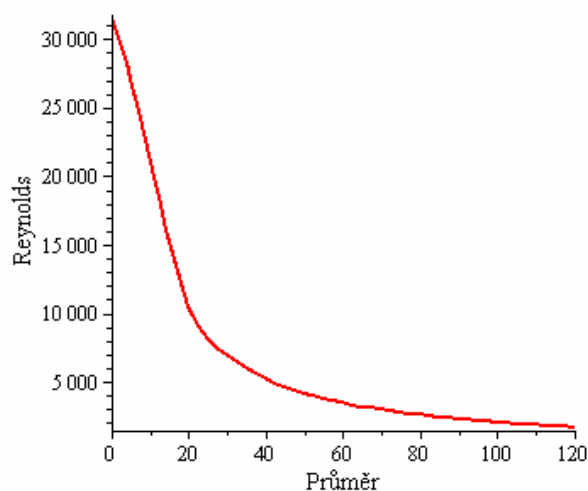


Závislost Re na dh při $m=1.3 \text{ kg/s}$

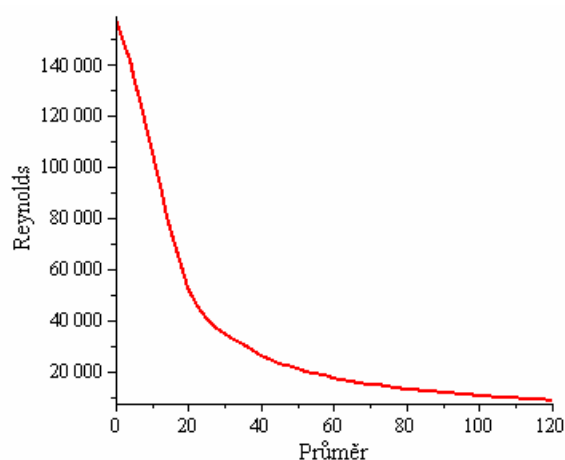


Závislost Re na dh při $m=2.1 \text{ kg/s}$

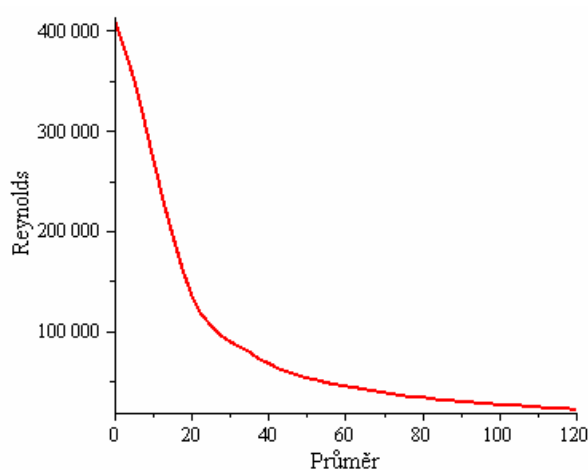
11.3.3 Grafy Kerosenu



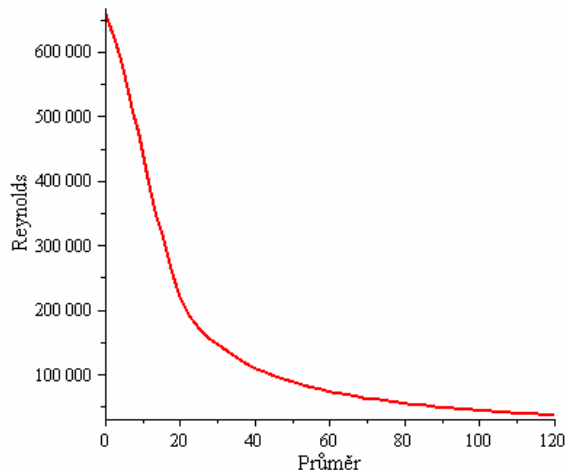
Závislost Re na dh při m=0.1 kg/s



Závislost Re na dh při m=0.5 kg/s

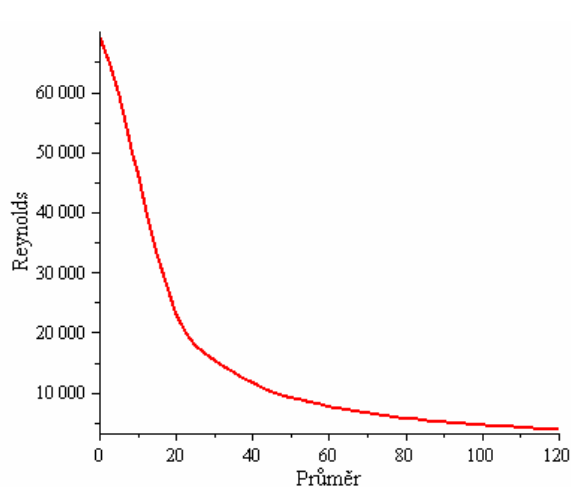


Závislost Re na dh při m=1.3 kg/s

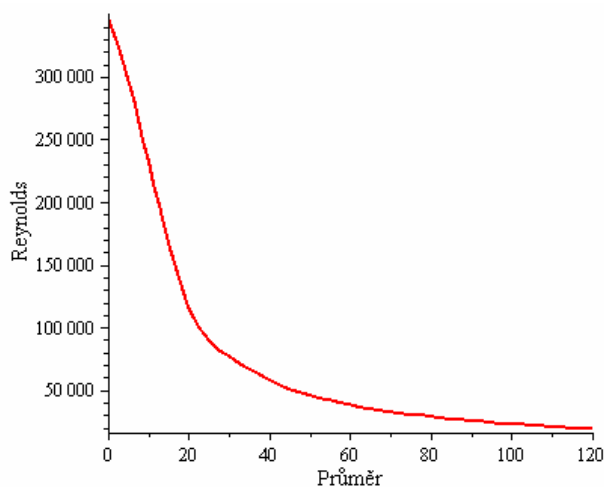


Závislost Re na dh při m=2.1 kg/s

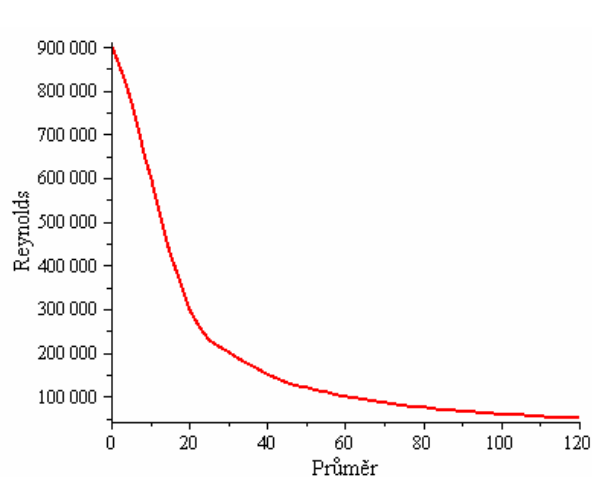
11.3.4 Grafy benzínu



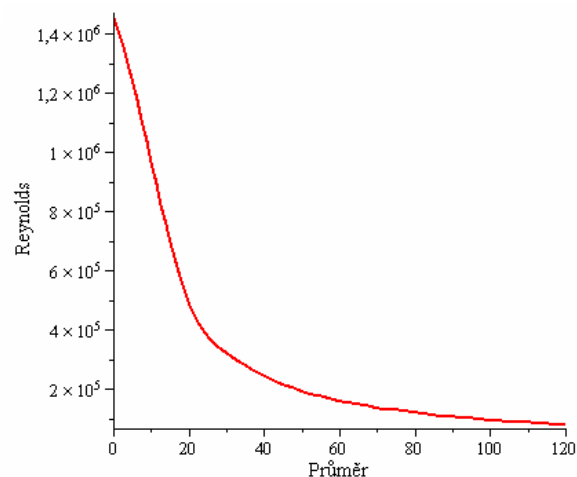
Závislost Re na dh při m=0.1 kg/s



Závislost Re na dh při m=0.5 kg/s

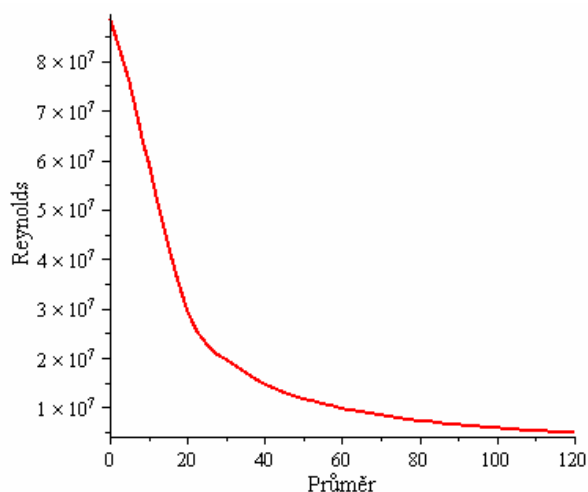


Závislost Re na dh při $m=1.3 \text{ kg/s}$

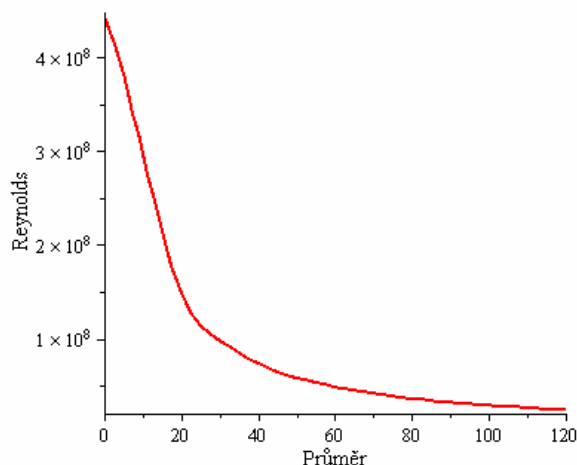


Závislost Re na dh při $m=2.1 \text{ kg/s}$

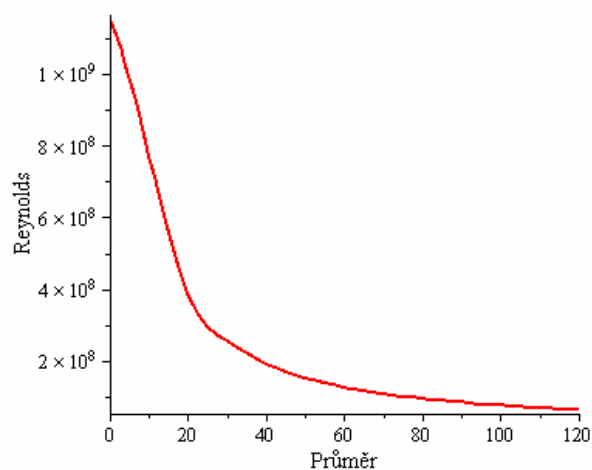
11.3.5 Grafy vzduchu



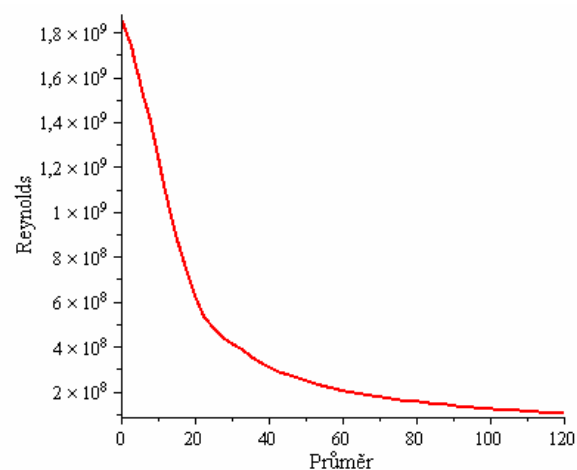
Závislost Re na dh při $m=0.1 \text{ kg/s}$



Závislost Re na dh při $m=0.5 \text{ kg/s}$



Závislost Re na dh při $m=1.3 \text{ kg/s}$



Závislost Re na dh při $m=2.1 \text{ kg/s}$

11.4 Zdrojový kód programu v jazyce VBA

Jedná se o soubor Dip_krobot_rezimT.xls

Zdrojový kód formuláře

```
Private Sub butOpakovat_Click()
```

```
    reset
```

```
End Sub
```

```
Private Sub butPocitej_Click()
```

```
    vypocet
```

```
End Sub
```

```
Private Sub butCancel_Click()
```

```
    Application.DisplayAlerts = False
```

```
    Application.Quit
```

```
End Sub
```

```
Private Sub uloz_Click()
```

```
    uložit
```

```
End Sub
```

Pomocné funkce a procedury

```
Function TextToStr(text As String) As Double
```

```
    TextToStr = Val(Replace(text, ",", "."))
```

```
End Function
```

```
Sub vypocet()
```

```
    Dim obj_prutok As Double
```

```
    Dim prumer As Double
```

```
    Dim delka As Double
```

```
    Dim vyska As Double
```

```
    Dim drsnost As Double
```

```
    Dim viskozita As Double
```

```
    Dim hustota As Double
```

```
    Dim zrychleni As Double
```

```
    Dim hm_prutok As Double
```

```
    Dim rychlost As Double
```

```
    Dim reynolds As Double
```

```
    Dim rezim As String
```

```
    Dim lambda As Double
```

```
    Dim ztrata_vyska As Double
```

```
Dim ztrata_proud As Double
Dim ztrata_celk As Double
Const pi = 3.14159265358979
'načtení vstupních hodnot-----
obj_prutok = TextToStr(f.obj_prutok.text)
prumer = TextToStr(f.prumer.text)
delka = TextToStr(f.delka.text)
vyska = TextToStr(f.vyska.text)
drsnost = TextToStr(f.drsnost.text)
vyskozita = TextToStr(f.vyskozita.text)
hustota = TextToStr(f.hustota.text)
zrychleni = TextToStr(f.zrychleni.text)
'výpočet-----
hm_prutok = obj_prutok / 1000 * hustota
rychlost = ((4 * obj_prutok) / (1000 * (prumer / 1000) ^ 2 *
pi))
reynolds = rychlost * prumer / 1000 * hustota / vyskozita
If (reynolds < 2300) Then
    lambda = 64 / reynolds
    rezim = "laminární"
Else
    lambda = (1 / (-2 * Log((6.81 / reynolds) ^ 0.9 +
drsnost / prumer / 3.7))) ^ 2
    rezim = "turbulentní"
End If
ztrata_proud = lambda * delka / (prumer / 1000) * (rychlost
^ 2) / 2 * hustota
ztrata_vyska = vyska * hustota * zrychleni
ztrata_celk = ztrata_proud + ztrata_vyska
f.hm_prutok.text = Round(hm_prutok, 4)
f.rychlost.text = Round(rychlost, 4)
f.reynolds.text = Round(reynolds, 1)
f.rezim.text = rezim
f.lambda.text = Round(lambda, 5)
f.ztrata_proud.text = Round(ztrata_proud, 1)
f.ztrata_vyska.text = Round(ztrata_vyska, 1)
f.ztrata_celk.text = Round(ztrata_celk, 1)
End Sub
Sub reset()
```

```
f.hm_prutok.text = 0
f.rychlost.text = 0
f.reynolds.text = 0
f.rezim.text = 0
f.lambda.text = 0
f.ztrata_proud.text = 0
f.ztrata_vyska.text = 0
f.ztrata_celk.text = 0
```

End Sub

```
Sub ulozit()
    'vytvoreni promennych-----
    Dim obsah As String
    Dim cesta, cestal As String
    'zapis do souboru a vlastni program-----
    cesta = ThisWorkbook.Path & "\"
    jmeno = f.name_s.text
    cestal = cesta & jmeno & ".txt"
    'tvorba obsahu -----
    Open cestal For Output As #1
    Write #1, "Zprava z výpočtu procesních charakteristik"
    Write #1, "Zpracoval David Krobot © 2009"
    Write #1, "-----"
    Write #1, " "
    Write #1, "Zadaná data"
    Write #1, "-----"
    Write #1, " "
    Write #1, "Objemový průtok: " & f.obj_prutok.text & " litrů/s"
    Write #1, "Průměr: " & f.prumer.text & " mm"
    Write #1, "Délka potrubí: " & f.delka.text & " m"
    Write #1, "Rozdíl výšek konců potrubí: " & f.vyska.text & " m"
    Write #1, "Absolutní drsnost potrubí: " & f.drsnost.text & " mm"
    Write #1, "Vyskozita: " & f.vyskozita.text & " Pa.s"
    Write #1, "Hustota: " & f.hustota.text & " kg/m3"
    Write #1, "Gravitační zrychlení: " & f.zrychleni.text & " m/s2"
    Write #1, " "
    Write #1, " "
    Write #1, "Vypočítané hodnoty"
    Write #1, "-----"
```

```

Write #1, "
Write #1, "Hmotnostní průtok: " & f.hm_prutok.text & " kg/s"
Write #1, "Rychlost: " & f.rychlost.text & " m/s"
Write #1, "Reynolds: " & f.reynolds.text
Write #1, "Režim toku: " & f.rezim.text
Write #1, "Lambda: " & f.lambda.text
Write #1, "Tlaková ztráta třením: " & f.ztrata_proud.text & " Pa"
Write #1, "Tlaková ztráta celková: " & f.ztrata_celk.text & " Pa"
Write #1, "
Write #1, "
Write #1, "----- "
Write #1, " Vytvoril David Krobot "
Close #1
End Sub

```

11.5 Zdrojové kódy pomocných programů Maple

Jedná se postupně o soubory

- Dip_krobot_f_prut_prum.mws
- Dip_krobot_f_prut_tepl.mws
- Dip_krobot_f_tepl_prum.mws

11.5.1 Vliv změny průměru trubky a hmotnostního toku

Program pro ukázkou vlivu změny průměru trubky a
hmotnostního průtoku na Reynoldsovo číslo

David Krobot

2009

```
> restart;
```

Fyzikální vlastnosti vody

Hustota

```

> frol:=T-
> spline([33.0,44.2,55.3,66.5,77.7,88.8,100.0],[994.02,990.30,985.68,
980.18,973.78,966.49,958.30],T,cubic):

```

Graf závislosti hustoty na teplotě

```
> plot(fro1(T),T=33..100,labels=["teplota [°C]","hustota  
[kg/(m3)]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Dynamická viskozita

```
> fdyl:=T-  
>spline([33.0,44.2,55.3,66.5,77.7,88.8,100.0],[0.000748,0.000605,0.0  
00504,0.000428,0.000367,0.000318,0.000284],T,cubic):  
> plot(fdyl(T),T=33..100,labels=["teplota [°C]","dynamická viskozita  
[Pa.s]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Fyzikální vlastnosti oleje

Fyzikální vlastnosti kerosenu

Fyzikální vlastnosti benzínu

Fyzikální vlastnosti vzduchu

Výpočet Reynoldsových čísel

```
> t_str:=80;                # Nastavení střední teploty proudu  
rho:=fro1(t_str);          # číslo u fro změnit dle požadované  
tekutiny 1-5  
eta:=fdyl(t_str);          # číslo u fdy změnit dle požadované  
tekutiny 1-5  
  
for i from 0 to 2 do        # Počet vyhodnocených grafů  
  m:=0.1+0.4*i;            # Nastavení hmotnostních toků, pro které  
  chceme hodnoty znát  
  
  for j from 0 to 12 do    # Počet hodnot do jednotlivých grafů  
    dh:=(10+10*j)/1000;    # Velikosti průměrů vynesných do grafu  
    A[j]:=dh*1000;  
    u:=evalf(4*m/(rho*Pi*dh^2));  
    Rey:=dh*u*rho/eta;  
    B[j]:=Rey;  
  end do;  
  
  Apole:=[seq(A[j],j=0..12)];  
  Bpole:=[seq(B[j],j=0..12)];  
  fce:=A->spline(Apole,Bpole,A,cubic);  
  plot(fce(A),A=0..120,labels=["Průměr  
[mm]","Reynolds"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

end do;

11.5.2 Vliv změny hmotnostního průtoku a střední teploty toku

Program pro ukázkou vlivu změny hmotnostního průtoku

a střední teploty toku na Reynoldsovo číslo

David Krobot

2009

> restart;

Fyzikální vlastnosti vody

Fyzikální vlastnosti oleje

Fyzikální vlastnosti kerosenu

Fyzikální vlastnosti benzínu

Fyzikální vlastnosti vzduchu

Výpočet hodnot Reynoldsova čísla

```
> for i from 0 to 5 do      # Počet vyhodnocených grafů
    dh:=35/1000;           # Nastavení hodnoty průměru trubky
    m:=0.1+0.4*i;          # Nastavení hmotnostních toků, pro které
    chceme hodnoty znát
```

```
    for j from 0 to 12 do  # Počet hodnot do jednotlivých grafů
        t_str:=20+j*10;    # Velikosti teplot vynesných do grafu
        A[j]:=t_str;
        rho:=fro2(t_str);   # číslo u fro změnit dle požadované
        tekutiny 1-5
        eta:=fdy2(t_str);   # číslo u fdy změnit dle požadované
        tekutiny 1-5
        u:=evalf(4*m/(rho*Pi*dh^2));
        Rey:=dh*u*rho/eta;
        B[j]:=Rey;
    end do;
```

```
    Apole:=[seq(A[j],j=0..12)];
    Bpole:=[seq(B[j],j=0..12)];
    fce:=A->spline(Apole,Bpole,A,cubic);
```

```
plot(fce(A),A=0..120,labels=["Teplota
[°C]", "Reynolds"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
end do;
```

11.5.3 Vliv změny průměru trubky a střední teploty proudu

Program pro ukázkou vlivu změny hmotnostního průtoku

a střední teploty toku na Reynoldsovo číslo

David Krobot

2009

```
> restart;
```

Fyzikální vlastnosti vody

Fyzikální vlastnosti oleje

Fyzikální vlastnosti kerosenu

Fyzikální vlastnosti benzínu

Fyzikální vlastnosti vzduchu

Výpočet hodnot Reynoldsova čísla

```
> for i from 0 to 5 do      # Počet vyhodnocených grafů
    dh:=35/1000;           # Nastavení hodnoty průměru trubky
    m:=0.1+0.4*i;          # Nastavení hmotnostních toků, pro které
    chceme hodnoty znát

    for j from 0 to 12 do   # Počet hodnot do jednotlivých grafů
        t_str:=20+j*10;    # Velikosti teplot vynesných do grafu
        A[j]:=t_str;

        rho:=fro2(t_str);   # Číslo u fro změnit dle požadované
        tekutiny 1-5
        eta:=fdy2(t_str);   # Číslo u fdy změnit dle požadované
        tekutiny 1-5
        u:=evalf(4*m/(rho*Pi*dh^2));
        Rey:=dh*u*rho/eta;
        B[j]:=Rey;
    end do;

    Apole:=[seq(A[j],j=0..12)];
    Bpole:=[seq(B[j],j=0..12)];
    fce:=A->spline(Apole,Bpole,A,cubic);
```

```
plot(fce(A), A=0..120, labels=["Teplota  
[°C]", "Reynolds"], labeldirections=[horizontal, vertical]);  
end do;
```

11.6 Kontrolní výpočty

Jedná se o dva programy, které uvažují rozdílný tok látky v mezitrubkovém prostoru (MP). Oba programy jsou velmi podobné, proto u druhého bude uvedena pouze ta část zdrojového kódu, která je odlišná. Jsou to programy:

- Výměník tepla s turbulentním tokem v mezitrubkovém prostoru chladiče
Dip_krobot_k_turb.mws
- Výměník tepla s laminárním tokem v mezitrubkovém prostoru
Dip_krobot_k_lam.mws

11.6.1 Kontrolní výpočet s turbulentním tokem v MP

Program na kontrolní výpočet výměníku trubka v trubce

David Krobot

2009

Předpoklad, teplejší médium 1 ve vnitřní trubce, vnitřní laminární, vnější turbulentní

Vstupní data

```
> restart;  
m1:=0.1:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1  
m2:=1.6:           #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2  
t11:=100:          #[°C] Teplota na vstupu látky 1  
t21:=22:           #[°C] Teplota na vstupu látky 2  
lambda:=45:        #[W/(m.K)] Tepelná vodivost materiálu trubek  
d1i:=0.04:         #[m] Vnitřní průměr trubky 1  
ts1:=0.0025:       #[m] Tloušťka stěny trubky 1  
d2i:=0.1:          #[m] Vnitřní průměr trubky 2  
l:= 12:            #[m] Délka trubek  
epsilon1:=0.002:   #[m] Drsnost povrchu vnitřní trubky  
epsilon2:=0.002:   #[m] Drsnost povrchu vnější trubky  
Rz1:=0:            #[m] Součinitel zanášení látky 1  
Rz2:=0:            #[m] Součinitel zanášení látky 2  
d_dp1:=10000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 1  
d_dp2:=10000:      #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 2
```

Fyzikální vlastnosti média 2

Sestavení interpolačních funkcí pro médium mezitrubkového prostoru

Data jsou uvedeny v pořadí:

- název látky	Kerosen
- počet tabelovaných hodnot	5
- teploty [st.C]	0 50 100 150 200
- hustoty [kg/m3]	825 788 750 712 676
- dynamické viskozity [Pa.s]	0.003 0.00108 0.00047 0.0002 0.00012
- měrné tep. kapacity [J/kg.K]	1840 2030 2220 2410 2600
- tepelné vodivosti [W/m.K]	0.156 0.144 0.133 0.121 0.109

Hustota

Tabelovanou závislost nejprve interpolujeme kubickým splinem, poté z ní vytvoříme funkci `fro`, která nám poté umožní získat hodnotu hustoty pro jakoukoliv teplotu.

```
> fro2:=T->spline([0, 50, 100, 150, 200],[825, 788, 750, 712, 676],T,cubic):
```

Graf závislosti hustoty na teplotě:

Vykreslení se provede příkazem `plot`.

```
> plot(fro2(T),T=0..200,labels=["teplota [°C]","hustota [kg/(m3)]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Dynamická viskozita

```
> fdy2:=T->spline([0, 50, 100, 150, 200],[0.003, 0.00108, 0.00047, 0.0002, 0.00012],T,cubic):
```

```
> plot(fdy2(T),T=0..200,labels=["teplota [°C]","dynamická viskozita [Pa.s]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Měrná tepelná kapacita

```
> fcp2:=T->spline([0, 50, 100, 150, 200],[1840, 2030, 2220, 2410, 2600],T,cubic):
```

```
> plot(fcp2(T),T=0..200,labels=["teplota [°C]","cp [J/kg.K]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Tepelná vodivost

```
> ftv2:=T->spline([0, 50, 100, 150, 200],[0.156, 0.144, 0.133, 0.121, 0.109],T,cubic):
```

```
> plot(ftv2(T),T=0..200,labels=["teplota [°C]","tepelná vodivost [W/m.K]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Fyzikální vlastnosti média 1

Sestavení interpolačních funkcí pro médium vnitřní trubky

Data jsou uvedeny v pořadí:

- název látky	olej
---------------	------

```
- počet tabelovaných hodnot      5
- teploty [st.C]                  20.0 60.0 100.0 140.0 180.0
- hustoty [kg/m3]                 1100.0 1065.0 1040.0 1010.0 1000.0
- dynamické viskozity [Pa.s]     0.040 0.015 0.006 0.002 0.0008
- měrné tep. kapacity [J/kg.K]    1618.0 1760.0 1937.0 2144.0 2385.0
- tepelné vodivosti [W/m.K]       0.144 0.136 0.131 0.128 0.126
```

Hustota

```
> frol:=T-
>spline([20,60,100,140,180],[1100,1065,1040,1010,1000],T,cubic):
```

Graf závislosti hustoty na teplotě:

Vykreslení se provede příkazem plot.

```
> plot(frol(T),T=20..180,labels=["teplota [°C]","hustota
[kg/(m3)"]],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Dynamická viskozita

```
> fdyl:=T->spline([20,60,100,140,180],
[0.04,0.015,0.006,0.002,0.0008],T,cubic):
> plot(fdyl(T),T=20..180,labels=["teplota [°C]","dynamická viskozita
[Pa.s]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Měrná tepelná kapacita

```
> fcp1:=T->spline([20,60,100,140,180],
[1618.0,1760.0,1937.0,2144.0,2385.0],T,cubic):
> plot(fcp1(T),T=20..180,labels=["teplota [°C]","cp
[J/kg.K]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Tepelná vodivost

```
> ftv1:=T->spline([20,60,100,140,180],
[0.144,0.136,0.131,0.128,0.126],T,cubic):
> plot(ftv1(T),T=20..180,labels=["teplota [°C]","tepelná vodivost
[W/m.K]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Výpočet společných charakteristik a předběžných výstupních teplot

Plochy výměny tepla, hydraulické průměry

```
> dlo:=dli+2*tsl; # Vnější průměr trubky 1
Alo:=evalf(dlo*Pi*l);
dh1:=dli;
dh2:=(d2i-dlo);
```

Střední měrná tepelná kapacita

Použije se pro výpočet bilanční rovnice a tedy i tepelného výkonu výměníku

```
> t12:=(t11+t21)/2;  
cp1_st:='int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12)';  
cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
```

Výpočet tepelného výkonu výměníku

Provede se díky známým parametrům média 1 pouze zde se použije hodnota cp1str

```
> Q1:='m1*cp1_st*(t11-t12)';Q1:=Q1;
```

Stanovení výstupní teploty pracovní látky 2

Neprve provedeme prvotní nástřel hodnot pro počáteční podmínky interpolace

```
> t22:=(t11+t21)/2;  
Q2:=1e12; it:=0;
```

Interakční procedura:

```
> while abs(Q1-Q2)>0.05 do  
  it:=it+1;  
  cp2_st:=int(fcp2(t),t=t21..t22)/(t22-t21);  
  Q2:=m2*cp2_st*(t22-t21);  
  t22:=(t21+Q1)/(m2*cp2_st);  
  rozdílQ:=abs(Q1-Q2);  
end do;
```

Vypočtené hodnoty:

```
> it:=it; cp2_st:=cp2_st; t22:=t22; rozdílQ:=abs(Q1-Q2);
```

Souproud

Předběžné výpočty a nástřely počátečních hodnot

Střední teplotní rozdíl

```
> d_T1:=t11-t21;  
  
> d_T2:=t12-t22;
```

Střední logaritmický teplotní rozdíl

```
> if (d_T1 > d_T2)
```

```
    then d_Tmax:=d_T1; d_Tmin:=d_T2;  
    else d_Tmax:=d_T2; d_Tmin:=d_T1;  
end if;  
  
> dT_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
```

Stanovení termofyzikálních vlastností pro střední teploty látek

```
> t1_st:=(t12+t11)/2; #střední teploty  
  
> t2_st:=(t21+t22)/2;  
  
> rho1:=fro1(t1_st); #hustoty  
  
> rho2:=fro2(t2_st);  
  
> eta1:=fdy1(t1_st); #dynamické viskozity  
  
> eta2:=fdy2(t2_st);  
  
> lambda1:=ftv1(t1_st); #tepelné vodivosti  
  
> lambda2:=ftv2(t2_st);  
  
> cp1:=fcp1(t1_st); #měrné tepelné kapacity  
  
> cp2:=fcp2(t2_st);
```

Procesní charakteristiky, rychlost proudění

Prandtlůva čísla

```
> Pr1:='eta1*cp1/lambda1';Pr1:=eta1*cp1/lambda1;  
  
> Pr2:='eta2*cp2/lambda2';Pr2:=eta2*cp2/lambda2;
```

Reynoldsova čísla, rychlost proudění látky 1 a 2

```
> u1:=evalf(4*m1/(rho1*Pi*d1i^2));  
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1;  
  
> u2:=evalf(4*m2/(rho2*Pi*(d2i^2-d1o^2)));  
Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;
```

Nástřel teploty stěny trubky

```
> tw:=(t1_st+t2_st)/2; # Předběžný nástřel teploty stěny trubky
```

Nusseltova čísla

```
> etaw:=fdy1(tw); # Výpočet dynamické viskozity při teplotě stěny
etaf:=fdy1(tl_st); # Výpočet dynamické viskozity při střední teplotě
proudu 1
Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/l))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14; # Trubkový
prostor

> Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4; # Mezitrubkový prostor
```

Součinitelé přestupu tepla

```
> alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
```

Součinitel prostupu tepla

```
>
k:='(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+
Rz2)))';

>
k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+R
z2)));

> Qc:=k*Alo*dT_ln;
```

Hlavní výpočtový blok

V tomto bloku vypočítáme teoretické výstupní hodnoty, výkon výměníku a ostatní charakteristiky

```
> Q1;
Q2;
it:=0;
Qx:=0;
Q2:=0;
cp1_st;
cp2_st;
t12;
t22;

> while abs(Qx-Qc)>0.1 do
    it:=it+1;
```

```

k:=(1/(d1o/d1i*(1/alpha1+Rz1)+d1o/(2*lambda)*ln(d1o/d1i)+(1/alpha2+Rz2)));
    if ( (t11-t21) > (t12-t22) )
        then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;
        else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;
    end if;
dT_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
Qc:=k*A1o*dT_ln;
Q1:=Qc;
    while abs(Q1-Q2)>0.1 do
        t12:=t11-Qc/(m1*cp1_st);
        t22:=t21+Qc/(m2*cp2_st);
        cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
        cp2_st:=int(fcp2(t),t=t21..t22)/(t22-t21);
        Q1:=m1*cp1_st*(t11-t12);
        Q2:=m2*cp2_st*(t22-t21);
        t1_st:=(t11+t12)/2;
        t2_st:=(t21+t22)/2;
        rozdilQ:=abs(Q1-Q2);
    end do;
t12:=t12;
t22:=t22;
Q2:=Q2;
rozdilQ:=rozdilQ;
rho1:=fro1(t1_st);
rho2:=fro2(t2_st);
eta1:=fdy1(t1_st);
eta2:=fdy2(t2_st);
cp1:=fcp1(t1_st);
cp2:=fcp2(t2_st);
lambda1:=ftv1(t1_st);
lambda2:=ftv2(t2_st);
u1:=evalf(4*m1/(rho1*Pi*d1i^2));
u2:=evalf(4*m2/(rho2*Pi*(d2i^2-d1o^2)));
Pr1:=eta1*cp1/lambda1;
Pr2:=eta2*cp2/lambda2;
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1;

```

```

Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;
tw:=(t1_st+t2_st)/2;
etaw:=fdy1(tw);
etaf:=fdy1(t1_st);
Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/l))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4;
alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+Rz2)));

if ( (t11-t21) > (t12-t22) )
    then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;
    else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;
end if;
dT_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
Qx:=k*Alo*dT_ln;
lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=(1/(-2*log((6.81/Rey2)^0.9+epsilon2/dh2/3.7)))^2;
d_p1:=lamb1*(1/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(1/dh2)*(u2^2*rho2/2);
end do;

it:=it; k:=k; dT_ln:=dT_ln; Qc:=Qc; Q1:=Q1; t12:=t12;
t22:=t22; Q2:=Q2; rozdilQ:=rozdilQ; rho1:=rho1;
rho2:=rho2; eta1:=eta1; eta2:=eta2; cp1:=cp1; cp2:=cp2;
lambda1:=lambda1; lambda2:=lambda2; u1:=u1; u2:=u2;
Pr1:=Pr1; Pr2:=Pr2; Rey1:=Rey1; Rey2:=Rey2; tw:=tw;
etaw:=etaw; eta1:=eta1; Nus1:=Nus1; Nus2:=Nus2;
alpha1:=alpha1; alpha2:=alpha2; Qx:=Qx; lamb1:=lamb1;
lamb2:=lamb2; d_p1:=d_p1; d_p2:=d_p2;

```

Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro sou proud

V zadání byl předpoklad turbulentního proudění v mezitrubkovém prostoru a laminárního proudění ve vnitřní trubce

```

> if (Rey1 < 2100)
    then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.");

```

```
    else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není  
splněn!!!");  
end if;  
if (Rey2 > 4000)  
    then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém  
prostoru je splněn.");  
    else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém  
prostoru není splněn!!!");  
end if;  
if (d_p1 < d_dp1)  
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní  
trubce je splněn.");  
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní  
trubce není splněn!!!");  
end if;  
if (d_p2 < d_dp2)  
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového  
prostoru je splněn.");  
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového  
prostoru není splněn!!!");  
end if;
```

Protiproud

Předběžné výpočty a nástřely počátečních hodnot

Kontrola zadaných hodnot, pouze se zde vymění t21 a t22!

```
>m1:=m1;m2:=m2;t11:=t11;t22:=t21;lambda:=lambda;dli:=dli;ts1:=ts1;d2  
i:=d2i;l:=l;Rz1:=Rz1;Rz2:=Rz2;epsilon1:=epsilon1;epsilon2:=epsilon2;  
d_dp1:=d_dp1;d_dp2:=d_dp2;
```

Nástřel výstupní teploty média 1, 2 a výkonu výměníku

```
> t12:=(t11+t22)/2;  
cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);  
Q1:=m1*cp1_st*(t11-t12);  
t21:=t22+0.1;  
Q2:=0;  
it:=0;  
while abs(Q1-Q2)>0.05 do  
    it:=it+1;  
    cp2_st:=int(fcp2(t),t=t22..t21)/(t21-t22);
```



```
Q2:=m2*cp2_st*(t21-t22);  
t21:=(t22+Q1)/(m2*cp2_st);  
rozdilQ:=abs(Q1-Q2);  
end do;
```

Hlavní výpočtový blok

```
> Qx:=0;  
Q:=Q2;  
it:=0;  
> while abs(Qx-Q)>0.1 do  
    it:=it+1;  
    t12:=t12;  
    t21:=t21;  
    Qx:=Q;  
    Q1:=Q;  
    while abs(Q1-Q2)>0.1 do  
        cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);  
        cp2_st:=int(fcp2(t),t=t22..t21)/(t21-t22);  
        t12:=(t11-Qx)/(m1*cp1_st);  
        t21:=(t22+Qx)/(m2*cp2_st);  
        Q1:=m1*cp1_st*(t11-t12);  
        Q2:=m2*cp2_st*(t21-t22);  
        rozdilQ:=abs(Q1-Q2);  
    end do;  
    Q1:=Q1;  
    Q2:=Q2;  
    t12:=t12;  
    t21:=t21;  
    if ( (t11-t21) > (t12-t22) )  
        then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;  
        else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;  
    end if;  
    d_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);  
    t1_st:=(t11+t12)/2;  
    t2_st:=(t21+t22)/2;  
    rho1:=fro1(t1_st);  
    rho2:=fro2(t2_st);  
    eta1:=fdy1(t1_st);
```

```

eta2:=fdy2(t2_st);
cp1:=fcp1(t1_st);
cp2:=fcp2(t2_st);
lambda1:=ftv1(t1_st);
lambda2:=ftv2(t2_st);
u1:=evalf(4*m1/(rho1*Pi*dli^2));
u2:=evalf(4*m2/(rho2*Pi*(d2i^2-dlo^2)));
Pr1:=eta1*cp1/lambda1;
Pr2:=eta2*cp2/lambda2;
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1;
Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;
tw:=(t1_st+t2_st)/2;
etaw:=fdy1(tw);
etaf:=fdy1(t1_st);
Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/l1))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4;
alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+Rz2)));
Q:=k*Alo*d_ln;
lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=(1/(-2*log((6.81/Rey2)^0.9+epsilon2/dh2/3.7)))^2;
d_p1:=lamb1*(1/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(1/dh2)*(u2^2*rho2/2);
end do;
printf("                                Vypočítané hodnoty                ");
printf("                                -----");
it:=it;  Q1:=Q1;  Q2:=Q2;  t12:=t12;  t21:=t21;  rho1:=rho1;
rho2:=rho2;  Pr1:=Pr1;  Pr2:=Pr2;  Rey1:=Rey1;  Rey2:=Rey2;
Nus1:=Nus1;  Nus2:=Nus2;  eta1:=eta1;  eta2:=eta2;  alpha1:=alpha1;
alpha2:=alpha2;  k:=k;  Q:=Q;  lamb1:=lamb1;  lamb2:=lamb2;
d_p1:=d_p1;  d_p2:=d_p2;

```

Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro protiproud

V zadání byl předpoklad turbulentního proudění v mezitrubkovém prostoru a laminárního proudění ve vnitřní trubce

```
> if (Rey1 < 2100)
```

```
    then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je  
splněn.");  
    else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není  
splněn!!!");  
end if;  
if (Rey2 > 4000)  
    then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém  
prostoru je splněn.");  
    else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém  
prostoru není splněn!!!");  
end if;  
if (d_p1 < d_dp1)  
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní  
trubce je splněn.");  
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní  
trubce není splněn!!!");  
end if;  
if (d_p2 < d_dp2)  
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového  
prostoru je splněn.");  
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového  
prostoru není splněn!!!");  
end if;
```

11.6.2 Kontrolní výpočet s laminárním tokem v MP

Jak bylo uvedeno výše, je zde pouze část zdrojového kódu, který je odlišný od předchozího příkladu s laminárním tokem v MP.

.....

Souproud

.....

Hlavní výpočtový blok

.....

```
> Pr1:=eta1*cp1/lambda1;  
Pr2:=eta2*cp2/lambda2;  
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1;  
Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;  
tw:=(t1_st+t2_st)/2;  
etaw:=fdy1(tw);  
etaf:=fdy1(t1_st);
```

```

Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/l))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
Nus2:=3.66+1.2*(d2i/dlo)^0.8+(0.19*(1+0.14*(d2i/dlo)^0.8)*
(Rey2*Pr2*dh2/l)^0.8)/(1+0.117*(Rey2*Pr2*dh2/l)^0.467);
alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=64/Rey2;
d_p1:=lamb1*(1/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(1/dh2)*(u2^2*rho2/2);

k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+R
z2)));
.....

```

Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro souproud

```

> if (Rey1 < 2100)
    then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je
splněn.");
    else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není
splněn!!!");
end if;
if (Rey2 < 2100)
    then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
prostoru je splněn.");
    else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
prostoru není splněn!!!");
end if;
....

```

Protiproud

....

Hlavní výpočtový blok

```

.....
> Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/l))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
Nus2:=3.66+1.2*(d2i/dlo)^0.8+(0.19*(1+0.14*(d2i/dlo)^0.8)*
(Rey2*Pr2*dh2/l)^0.8)/(1+0.117*(Rey2*Pr2*dh2/l)^0.467);
alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+R
z2)));
Q:=k*Alo*d_ln;

```

```

    lamb1:=64/Rey1;
    lamb2:=64/Rey2;
    d_p1:=lamb1*(1/dh1)*(u1^2*rho1/2);
    d_p2:=lamb2*(1/dh2)*(u2^2*rho2/2);
    .....

```

Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro protiproud

```

> if (Rey1 < 2100)
    then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je
splněn.");
    else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není
splněn!!!");
end if;
if (Rey2 < 2100)
    then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
prostoru je splněn.");
    else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
prostoru není splněn!!!");
end if;
....

```

11.7 Návrhové výpočty

Opět, jako v předchozích příkladech i u návrhového výpočtu jsou zpracovány dva programy. Oba programy jsou opět velmi podobné, proto u druhého bude uvedena pouze ta část zdrojového kódu, která je odlišná. Jsou to návrhové programy:

- Výměník tepla s turbulentním tokem v mezitrubkovém prostoru chladiče
Dip_krobot_n_turb.mws
- Výměník tepla s laminárním tokem v mezitrubkovém prostoru
Dip_krobot_n_lam.mws

11.7.1 Návrhový výpočet s turbulentním tokem v MP

Program pro návrhový výpočet výměníku trubka v trubce
David Krobot

2009

Předpoklad: teplejší médium 1 ve vnitřní trubce, vnitřní proudění je laminární, vnější je turbulentní.

Příprava rovnic pro výpočet požadované délky potrubí

V tomto bloku bude vytvořena rovnice pro výpočet požadované délky trubky

```
> restart;
```

```
r0:=A=Pi*dlo*L; # Plocha výměny tepla
```

```
r1:=Q=A*dt_ln*k;
```

$$r0 := A = \pi d_{lo} L$$

$$r1 := Q = A dt_{ln} k$$

Součinitel prostupu tepla s vlivem zanášení

```
>
```

```
r2:=k=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+Rz2)));
```

$$r2 := k = \frac{1}{\frac{d_{lo} \left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{z1} \right)}{d_{li}} + \frac{1}{2} \frac{d_{lo} \ln \left(\frac{d_{lo}}{d_{li}} \right)}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{z2}}$$

Součinitel přestupu tepla v trubkovém a mezitrubkovém prostoru

```
>
```

```
r3:=alpha1=(lambda1*1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/L))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14)/dh1;
```

```
r4:=alpha2=(lambda2*0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4)/dh2;
```

$$r3 := \alpha_1 = \frac{1.86 \lambda_1 \left(\frac{Rey_1 Pr_1 dh_1}{L} \right)^{(1/3)} \left(\frac{\eta_{af}}{\eta_{aw}} \right)^{0.14}}{dh_1}$$

$$r4 := \alpha_2 = \frac{0.023 \lambda_2 Rey_2^{0.8} Pr_2^{0.4}}{dh_2}$$

```
> r5:=subs(r4,r3,r2);
```

```
r6:=subs(r5,r0,r1);
```

$$r5 := k = 1 / \left(\frac{d_{lo} \left(\frac{0.5376344086 dh_1}{\lambda_1 \left(\frac{Rey_1 Pr_1 dh_1}{L} \right)^{(1/3)} \left(\frac{\eta_{af}}{\eta_{aw}} \right)^{0.14}} + R_{z1} \right)}{d_{li}} + \frac{1}{2} \frac{d_{lo} \ln \left(\frac{d_{lo}}{d_{li}} \right)}{\lambda} + \frac{43.47826087 dh_2}{\lambda_2 Rey_2^{0.8} Pr_2^{0.4}} + R_{z2} \right)$$

$$r5 := k = 1 / \left(\frac{d_{lo} \left(\frac{0.5376344086 dh_1}{\lambda_1 \left(\frac{Rey_1 Pr_1 dh_1}{L} \right)^{(1/3)} \left(\frac{\eta_{af}}{\eta_{aw}} \right)^{0.14}} + R_{z1} \right)}{d_{li}} + \frac{1}{2} \frac{d_{lo} \ln \left(\frac{d_{lo}}{d_{li}} \right)}{\lambda} + \frac{43.47826087 dh_2}{\lambda_2 Rey_2^{0.8} Pr_2^{0.4}} + R_{z2} \right)$$

$$r6 := Q = \pi dlo L dt_{ln} \left(\frac{dlo \left(\frac{0.5376344086 dh1}{\lambda1 \left(\frac{Rey1 Pr1 dh1}{L} \right)^{(1/3)} \left(\frac{etaf}{etaw} \right)^{0.14} + Rz1} \right)}{dli} + \frac{1}{2} \frac{dlo \ln \left(\frac{dlo}{dli} \right)}{\lambda} + \frac{43.47826087 dh2}{\lambda2 Rey2^{0.8} Pr2^{0.4}} + Rz2 \right)$$

Vstupní data

```
> m1:=0.2:      #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 1
m2:=0.3:      #[kg/s] Průtočné množství pracovní látky 2
t11:=85.:      #[°C] Teplota na vstupu látky 1
t21:=20.:      #[°C] Teplota na vstupu látky 2
t22:=23.:      #[°C] Požadovaná teplota na výstupu látky 2
lambda:=45.:   #[W/(m.K)] Tepelná vodivost materiálu trubek
dli:=0.015:    #[m] Vnitřní průměr trubky 1
ts1:=0.002:    #[m] Tloušťka stěny trubky 1
d2i:=0.03:     #[m] Vnitřní průměr trubky 2
epsilon1:=0.002: #[m] Drsnost povrchu vnitřní trubky
epsilon2:=0.002: #[m] Drsnost povrchu vnější trubky
Rz1:=0:        #[Součinitel zanášení látky 1]
Rz2:=0:        #[Součinitel zanášení látky 2]
d_dp1:=25000:  #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 1
d_dp2:=25000:  #[Pa] Dovolená tlaková ztráta média 2
```

Fyzikální vlastnosti média 1

Sestavení interpolačních funkcí pro médium v mezitrubkovém prostoru

V tomto případě je to voda. A interpolační funkce se sestaví díky tabelovaným hodnotám:

Termofyzikální vlastnosti látek :

Data jsou uvedeny v pořadí:

```
- písmenný kód - název látky      A - voda
- tlak pracovní látky [kPa]       500
- počet tabelovaných hodnot       7
- teploty [st.C]                   33.0 44.2 55.3 66.5 77.7 88.8 100.0
- hustoty [kg/m3]                   994.02 990.30 985.68 980.18 973.78
966.49 958.30
- dynamické viskozity [Pa.s]      0.000748 0.000605 0.000504 0.000428
0.000367 0.000318 0.000284
```

- měrné tepelné kapacity [J/kg.K] 4167.0 4167.3 4170.7 4177.2
4186.7 4199.4 4215.2

- tepelné vodivosti [W/m.K] 0.6229 0.6402 0.6545 0.6660
0.6745 0.6802 0.6829

Hustota

```
> fro2:=T-
>spline([33.0,44.2,55.3,66.5,77.7,88.8,100.0],[994.02,990.30,985.68,
980.18,973.78,966.49,958.30],T,cubic):
```

Graf závislosti hustoty na teplotě:

```
> plot(fro2(T),T=33..100,labels=["teplota [°C]","hustota
[kg/(m3)"]],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Dynamická viskozita

```
> fdy2:=T-
>spline([33.0,44.2,55.3,66.5,77.7,88.8,100.0],[0.000748,0.000605,0.0
00504,0.000428,0.000367,0.000318,0.000284],T,cubic):
> plot(fdy2(T),T=33..100,labels=["teplota [°C]","dynamická viskozita
[Pa.s]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Měrná tepelná kapacita

```
> fcp2:=T-
>spline([33.0,44.2,55.3,66.5,77.7,88.8,100.0],[4167.0,4167.3,4170.7,
4177.2,4186.7,4199.4,4215.2],T,cubic):
> plot(fcp2(T),T=33..100,labels=["teplota [°C]","cp
[J/kg.K]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Tepelná vodivost

```
> ftv2:=T-
>spline([33.0,44.2,55.3,66.5,77.7,88.8,100.0],[0.6229,0.6402,0.6545,
0.6660,0.6745,0.6802,0.6829],T,cubic):
> plot(ftv2(T),T=33..100,labels=["teplota [°C]","tepelná vodivost
[W/m.K]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Fyzikální vlastnosti média 2

Sestavení interpolačních funkcí pro médium vnitřní trubky

V tomto případě je oběma médii olej. A interpolační funkce se sestaví díky tabelovaným hodnotám:

Termofyzikální vlastnosti látky :

Data jsou uvedeny v pořadí:

- písmenný kód - název látky C - olej
- tlak pracovní látky [kPa] 700
- počet tabelovaných hodnot 5


```
- teploty [st.C]          20.0 60.0 100.0 140.0 180.0
- hustoty [kg/m3]         1100.0 1065.0 1040.0 1010.0 1000.0
- dynamické viskozity [Pa.s] 0.040 0.015 0.006 0.002 0.0008
- měrné tepelné kapacity [J/kg.K] 1618.0 1760.0 1937.0 2144.0
2385.0
- tepelné vodivosti [W/m.K] 0.144 0.136 0.131 0.128 0.126
```

Hustota

```
> fro1:=T->spline([20,60,100,140,180], [1100,1065,1040,1010,1000],
T,cubic):
```

Graf závislosti hustoty na teplotě:

Vykreslení se provede příkazem plot.

```
> plot(fro1(T),T=20..180,labels=["teplota [°C]","hustota
[kg/(m3)"]],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Dynamická viskozita

```
> fdyl:=T-
>spline([20,60,100,140,180],[0.04,0.015,0.006,0.002,0.0008],T,cubic)
:
> plot(fdyl(T),T=20..180,labels=["teplota [°C]","dynamická viskozita
[Pa.s]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Měrná tepelná kapacita

```
> fcp1:=T-
>spline([20,60,100,140,180],[1618.0,1760.0,1937.0,2144.0,2385.0],T,c
ubic):
> plot(fcp1(T),T=20..180,labels=["teplota [°C]","cp
[J/kg.K]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Tepelná vodivost

```
> ftv1:=T-
>spline([20,60,100,140,180],[0.144,0.136,0.131,0.128,0.126],T,cubic)
:
> plot(ftv1(T),T=20..180,labels=["teplota [°C]","tepelná vodivost
[W/m.K]"],labeldirections=[horizontal,vertical]);
```

Společné charakteristiky

Požadovaný tepelný výkon výměníku

Výpočet se provede s bilanční rovnice

```
> cp2_st:=int(fcp2(t),t=t21..t22)/(t22-t21);
Q2:=m2*cp2_st*(t22-t21);
```

```
Q:=Q2;
```

Výstupní teplota média 1

S použitím interačního postupu

```
> it:=0: #Nástřel hodnot
```

```
Q1:=0.1:
```

```
t12:=(t11+t21)/2:
```

```
cp1_st:='int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12)';
```

```
cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
```

```
> while abs(Q1-Q2)>0.01 do
```

```
    it:=it+1;
```

```
    t12:=(t11-Q2)/(m1*cp1_st);
```

```
    cp1_st:=int(fcp1(t),t=t12..t11)/(t11-t12);
```

```
    Q1:=m1*cp1_st*(t11-t12);
```

```
    rozdilQ:=abs(Q1-Q2);
```

```
end do;
```

Rozměrové data

```
> dlo:=dli+ts1;
```

```
dh1:=dli;
```

```
dh2:=(d2i^2-dlo^2)/(d2i+dlo);
```

Stanovení termofyzikálních vlastností pro střední teploty látek

```
> t1_st:=(t12+t11)/2; #střední teploty
```

```
> t2_st:=(t21+t22)/2;
```

```
> rho1:=fro1(t1_st); #hustoty
```

```
> rho2:=fro2(t2_st);
```

```
> eta1:=fdy1(t1_st); #dynamické viskozity
```

```
> eta2:=fdy2(t2_st);
```

```
> lambda1:=ftv1(t1_st); #tepelné vodivosti
```

```
> lambda2:=ftv2(t2_st);
```

```
> cp1:=fcp1(t1_st); #měrné tepelné kapacity
```

```
> cp2:=fcp2(t2_st);
```

Procesní charakteristiky, rychlost proudění

Prandtlůva čísla

```
> Pr1:='eta1*cp1/lambda1';Pr1:=eta1*cp1/lambda1;  
> Pr2:='eta2*cp2/lambda2';Pr2:=eta2*cp2/lambda2;
```

Reynoldsova čísla, rychlost proudění látky 1 a 2

```
> u1:=evalf(4*m1/(rho1*Pi*dli^2));  
Rey1:=dh1*u1*rho1/eta1;  
> u2:=evalf(4*m2/(rho2*Pi*(d2i^2-dlo^2)));  
Rey2:=dh2*u2*rho2/eta2;
```

Souproud**Hlavní výpočet**Střední logaritmický teplotní rozdíl

```
> if ( (t11-t21) > (t12-t22) )  
    then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;  
    else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;  
end if;  
dt_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
```

Potřebná délka výměníku

Dynamická hustota pro střední teplotu média 1

```
> etaf:=fdy1(t1_st);
```

Nuseltovo číslo tekutiny 2 a součinitel přenosu tepla

```
> Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4;  
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
```

Výpočet teploty stěny a potřebné délky výměníku

```
> tw1:=(t1_st+t2_st)/2;  
tw:=5:  
it:=0:  
  
while abs(tw-tw1)>0.05 do  
    it:=it+1;
```

```

    tw:=tw1;
    etaw:=fdy1(tw);
    Q4:=Q1=evalf(rhs(r6));
    L_x:=solve(Q4,L);
    Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/L_x))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
    alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;

k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+R
z2)));

    q_w:=k*dt_ln;
    tw1:=t1_st-(q_w/alpha1);
    rozdil_tw:=tw-tw1;
    printf(" ");
    printf(" ");
    printf("
-----");
    end do;

```

Velikosti tlakových ztrát

```

> lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=(1/(-2*log((6.81/Rey2)^0.9+epsilon2/dh2/3.7)))^2;
d_p1:=lamb1*(L_x/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(L_x/dh2)*(u2^2*rho2/2);

```

Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro sou proud

V zadání byl předpoklad turbulentního proudění v mezitrubkovém prostoru a laminárního proudění ve vnitřní trubce

```

> if (Rey1 < 2100)
    then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je
splněn.");
    else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není
splněn!!!");
end if;
if (Rey2 > 4000)
    then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
prostoru je splněn.");
    else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém
prostoru není splněn!!!");
end if;
if (d_p1 < d_dp1)

```

```
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní  
trubce je splněn.");  
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní  
trubce není splněn!!!");  
end if;  
if (d_p2 < d_dp2)  
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového  
prostoru je splněn.");  
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového  
prostoru není splněn!!!");  
end if;
```

Protiproud

```
> tx:=t21: t21:=t22: t22:=tx;
```

Hlavní výpočet

Střední logaritmický teplotní rozdíl

```
> if ( (t11-t21) > (t12-t22) )  
    then d_Tmax:=t11-t21; d_Tmin:=t12-t22;  
    else d_Tmax:=t12-t22; d_Tmin:=t11-t21;  
end if;  
dt_ln:=(d_Tmax-d_Tmin)/ln(d_Tmax/d_Tmin);
```

Potřebná délka výměníku

Dynamická hustota pro střední teplotu média 1

```
> etaf:=fdy1(t1_st);
```

useltovo číslo tekutiny 2 a součinitel přenosu tepla

```
> Nus2:=0.023*Rey2^0.8*Pr2^0.4;  
alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;
```

Výpočet teploty stěny a potřebné délky výměníku

```
> tw1:=(t1_st+t2_st)/2;  
tw:=5:  
it:=0:  
  
while abs(tw-tw1)>0.05 do  
    it:=it+1;
```

```

tw:=tw1;
etaw:=fdy1(tw);
Q4:=Q1=evalf(rhs(r6));
L_x:=solve(Q4,L);
Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/L_x))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;
alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;

k:=(1/(dlo/dli*(1/alpha1+Rz1)+dlo/(2*lambda)*ln(dlo/dli)+(1/alpha2+Rz2)));

q_w:=k*dt_ln;
tw1:=t1_st-(q_w/alpha1);
rozdil_tw:=tw-tw1;
printf(" ");
printf(" ");
printf("-----");
end do;

```

Velikosti tlakových ztrát

```

> lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=(1/(-2*log((6.81/Rey2)^0.9+epsilon2/dh2/3.7)))^2;
d_p1:=lamb1*(L_x/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(L_x/dh2)*(u2^2*rho2/2);

```

Ověření možnosti použití výpočtových vzorců pro protiproud

V zadání byl předpoklad turbulentního proudění v mezitrubkovém prostoru a laminárního proudění ve vnitřní trubce

```

> if (Rey1 < 2100)
  then printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce je splněn.");
  else printf("Předpoklad laminárního toku ve vnitřní trubce není splněn!!!");
end if;

if (Rey2 > 4000)
  then printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru je splněn.");
  else printf("Předpoklad turbulentního toku v mezitrubkovém prostoru není splněn!!!");
end if;

if (d_p1 < d_dp1)

```

```

    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní
trubce je splněn.");
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty ve vnitřní
trubce není splněn!!!");
end if;
if (d_p2 < d_dp2)
    then printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového
prostoru je splněn.");
    else printf("Požadavek maximální tlakové ztráty mezitrubkového
prostoru není splněn!!!");
end if;

```

11.7.2 Návrhový výpočet s laminárním tokem v MP

Jak bylo uvedeno výše, je zde pouze část zdrojového kódu, který je odlišný od předchozího příkladu s laminárním tokem v MP.

...

Příprava rovnic pro výpočet požadované délky potrubí

...

```

>
r3:=alpha1=(lambda1*1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/L))^(1/3))* (etaf/etaw)^0.14
)/dh1;
r4:=alpha2=(lambda2*(3.66+1.2*(d2i/d1o)^0.8+(0.19*(1+0.14*(d2i/d1o)^
0.8)*(Rey2*Pr2*dh2/L)^0.8)/(1+0.117*(Rey2*Pr2*dh2/L)^0.467)))/dh2;

```

$$r3 := \alpha1 = \frac{1.86 \lambda1 \left(\frac{Rey1 Pr1 dh1}{L} \right)^{(1/3)} \left(\frac{\eta_{af}}{\eta_{aw}} \right)^{0.14}}{dh1}$$

$$r4 := \alpha2 = \frac{\lambda2 \left[3.66 + 1.2 \left(\frac{d2i}{d1o} \right)^{0.8} + \frac{0.19 \left(1 + 0.14 \left(\frac{d2i}{d1o} \right)^{0.8} \right) \left(\frac{Rey2 Pr2 dh2}{L} \right)^{0.8}}{1 + 0.117 \left(\frac{Rey2 Pr2 dh2}{L} \right)^{0.467}} \right]}{dh2}$$

```

> r5:=subs(r4,r3,r2);

```

```

r6:=subs(r5,r0,r1);

```

...

Souproud

...

Nuseltovo číslo tekutiny 2

```

> tw1:=(t1_st+t2_st)/2;

```

```

tw:=5:

```

```

it:=0:

```

```

while abs(tw-tw1)>0.05 do
    it:=it+1;
    tw:=tw1;
    etaw:=fdy1(tw);
    Q4:=Q1=evalf(rhs(r6));
    L_x:=fsolve(Q4,L);
    Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/L_x))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;

Nus2:=3.66+1.2*(d2i/d1o)^0.8+(0.19*(1+0.14*(d2i/d1o)^0.8)*(Rey2*Pr2*
dh2/L_x)^0.8)/(1+0.117*(Rey2*Pr2*dh2/L_x)^0.467);
    alfa1:=Nus1*lambda1/dh1;
    alfa2:=Nus2*lambda2/dh2;

k:=(1/(d1o/d1i*(1/alfa1+Rz1)+d1o/(2*lambda)*ln(d1o/d1i)+(1/alfa2+R
z2)));
    q_w:=k*dt_ln;
    tw1:=t1_st-(q_w/alfa1);
    rozdil_tw:=tw-tw1;
    printf(" ");
    printf(" ");
    printf("-----");
end do;

```

Velikosti tlakových ztrát

```

> lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=64/Rey2;
d_p1:=lamb1*(L_x/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(L_x/dh2)*(u2^2*rho2/2);
...

```

Protiproud

```

> tx:=t21: t21:=t22: t22:=tx;
...
Nuseltovo číslo tekutiny 2
> tw1:=(t1_st+t2_st)/2;
tw:=5:
it:=0:

```



```

while abs(tw-tw1)>0.05 do
    it:=it+1;
    tw:=tw1;
    etaw:=fdy1(tw);
    Q4:=Q1=evalf(rhs(r6));
    L_x:=fsolve(Q4,L);
    Nus1:=1.86*((Rey1*Pr1*(dh1/L_x))^(1/3))*(etaf/etaw)^0.14;

Nus2:=3.66+1.2*(d2i/d1o)^0.8+(0.19*(1+0.14*(d2i/d1o)^0.8)*(Rey2*Pr2*
dh2/L_x)^0.8)/(1+0.117*(Rey2*Pr2*dh2/L_x)^0.467);
    alpha1:=Nus1*lambda1/dh1;
    alpha2:=Nus2*lambda2/dh2;

k:=(1/(d1o/d1i*(1/alpha1+Rz1)+d1o/(2*lambda)*ln(d1o/d1i)+(1/alpha2+R
z2)));
    q_w:=k*dt_ln;
    tw1:=t1_st-(q_w/alpha1);
    rozdil_tw:=tw-tw1;
    printf(" ");
    printf(" ");
    printf("-----");
end do;

```

Velikosti tlakových ztrát

```

> lamb1:=64/Rey1;
lamb2:=64/Rey2;
d_p1:=lamb1*(L_x/dh1)*(u1^2*rho1/2);
d_p2:=lamb2*(L_x/dh2)*(u2^2*rho2/2);
...

```